

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.04.053>

УДК 551.5:539.104 (078)

Y. Luo, Л. Ф. Чорногор, К. П. Гармаш

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
пл. Свободи, 4, м. Харків, Україна
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

**Магнітоіоносферні ефекти геокосмічної бурі
21—23 березня 2017 р.**

Системою, в якій розвиваються геокосмічні бурі, є об'єкт Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (внутрішні оболонки) (СМСМІАЗ). Дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур — найважливіший науковий напрям в космічній геофізиці. Проблема взаємодії підсистем у системі СМСМІАЗ протягом геокосмічних бур — міждисциплінарна, для її розв'язання потрібен системний підхід. Проблема носить багатофакторний характер. Реакція підсистем визначається одночасним (синергетичним) впливом низки збурювальних факторів. Важливо, що система СМСМІАЗ — відкрита, нелінійна та нестационарна. У ній виявляються прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки. З огляду на багатогранність проявів геокосмічних бур, через унікальність кожної бурі вивчення фізичних ефектів геокосмічних бур є актуальнукою науковою задачею. Крім задач всебічного дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур, на повний зріст стоять задачі їхнього детального адекватного моделювання та прогнозування. Їхній розв'язок буде сприяти виживанню та сталому розвитку нашої цивілізації, яка опановує все більш досконалі та складні технології. Що вищим буде технологічний розвиток землян, то вразливішою буде інфраструктура цивілізації до впливів сонячних і геокосмічних бур. Мета цієї роботи — виклад результатів аналізу магнітоіоносферних ефектів, що супроводжували геокосмічну бурю 21...23 березня 2017 р. Для спостереження ефектів у іоносфері та магнітному полі, викликаних геокосмічною бурою 21...23 березня 2017 р., використовувались такі засоби. Несерійний цифровий іонозонд і допплерівський радар вертикального зондування, розташовані в Радіофізичній обсерваторії ХНУ

імені В. Н. Каразіна ($49^{\circ}38$ пн. ш., $36^{\circ}20$ сх. д.), а також магнітотометр-флюксметр, дислокований у Магнітометричній обсерваторії університету ($49^{\circ}38$ пн. ш., $36^{\circ}56$ сх. д.). Допплерівський радар вертикального зондування проводить вимірювання, як правило, на двох фіксованих частотах — 3.2 і 4.2 МГц. Менша з них ефективна при дослідженні динамічних процесів у E- і F1-шарах, а більша — в F1 і F2-шарах. Магнітотометр-флюксметр призначено для ведення моніторингу за варіаціями горизонтальних H- і D-складових геомагнітного поля у діапазоні періодів $1\dots1000$ с. Іоносферні процеси аналізувалися за допомогою іонограм. Залежності діючої висоти з від частоти спочатку перетворювались в залежності концентрації електронів N від істинної висоти z . Потім будувались часові залежності $N(t)$ для фіксованих висот у діапазоні $140\dots260$ км. Далі за допомогою системного спектрального аналізу оцінювались періоди T та абсолютні амплітуди N_a квазіперіодичних варіацій $N(t)$, а також їхні відносні варіації $\frac{N_a}{N}$. Для аналізу застосовувалися також амплітуди відбитого сигналу допплерівського радара вертикального зондування. Стробування відбитого сигналу дозволило отримати часові залежності амплітуди биттів відбитого сигналу та коливань опорного генератора, а також допплерівські зміщення частоти для певних висотних діапазонів. Це забезпечило можливість простежити за динамікою амплітууд і висоти відбиття радіохвиль як протягом доби, так і протягом іоносферних бур. Детально аналізувалися й допплерівські спектри. За часовими варіаціями амплітууд биттів із використанням перетворення Фур'є на інтервалі часу 60 с побудовано часові залежності допплерівських спектрів у діапазоні видимості $2\dots+2$ Гц. Далі формувались часові залежності допплерівського зміщення частоти $f_d(t)$ для основної моди. Потім залежності $f_d(t)$ піддавались системному спектральному аналізу на інтервалі часу 120 хв. Сигнал на виході магнітотометра-флюксметра з урахуванням амплітуудно-частотної характеристики приладу перетворювався з сигналу у відносних одиницях у абсолютні (нанотесла). Створювалися часові залежності рівня H- і D-компонентів. Далі ці залежності піддавались системному спектральному аналізу на інтервалі часу 12 год у діапазоні періодів $T = 1\dots1000$ с. Основні результати досліджень такі. Геокосмічна буря, енергія за одиницю часу якої сягала 20 Дж/с, спостерігалась $21\dots23$ березня 2017 р. За своєю інтенсивністю буря відноситься до слабких. Геокосмічна буря супроводжувалась слабким іоносферним збуренням у денний час і сильною іоносферною бурею в нічний час. Концентрація електронів при цьому зменшувалась у 1.3 та $4\dots5$ разів відповідно. Геокосмічна буря також супроводжувалась двома помірними магнітними бурями з енергією порядку 10^{15} Дж і потужністю 70 ГВт. Під час магнітних бур рівень флюктуацій горизонтальних складових в діапазоні періодів $100\dots1000$ с збільшувався від ± 0.5 до ± 5 нТл. Період переважних коливань при цьому зростав від $500\dots900$

до 900...1000 с. При цьому суттєво змінювався спектр флюктуацій.

Ключові слова: іоносфера, геокосмічна буря, магнітна буря, іоносферні ефекти, допплерівське зміщення частоти, область відбиття радіохвиль, квазіперіодичне збурення, параметри збурення.

ВСТУП

У роботах [15, 19] ефекти геокосмічних бур (ГБ) проаналізовано з позиції системної парадигми. Системою, в якій розвиваються геокосмічні бурі, є об'єкт Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (внутрішні оболонки) (СМСМІАЗ). Підкреслювалося, що дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур — найважливіший науковий напрям у космічній геофізиці. Обґрунтовано, що проблема взаємодії підсистем у системі СМСМІАЗ протягом ГБ — міждисциплінарна, для її розв'язання повинен бути системний підхід. Показано, що проблема носить багатофакторний характер. Реакція підсистем визначається одночасним (синергетичним) впливом низки збурювальних факторів. Важливо, що система СМСМІАЗ — відкрита, нелінійна та нестационарна. У ній виявляються прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки. З огляду на багатогранність проявів геокосмічних бур, через унікальність кожної бурі вивчення фізичних ефектів геокосмічних бур далеке до завершення. Крім завдань всебічного дослідження фізичних ефектів геокосмічних бур, не менш важливими є задачі їхнього детального адекватного моделювання та прогнозування. Їхній розв'язок буде сприяти виживанню та сталому розвитку нашої цивілізації, яка опановує все більш досконалі та складні технології. Що вищим буде технологічний розвиток землян, то вразливішою буде інфраструктура цивілізації до впливів сонячних і геокосмічних бур.

З огляду на велику практичну значущість часто основну увагу в роботах приділяли вивчення особливостей іоносферних бур і меншу увагу — особливостям магнітних бур. Деякі з робіт стали класичними [9, 10, 22, 27, 28, 34, 39, 41, 50, 60, 67—69, 80, 83]. В інших роботах вивчалися особливості окремих іоносферних бур. Значна увага приділялася іоносферним супербурям, які мали місце 29—31 жовтня та 19—20 листопада 2003 р., 7—8 листопада 2004 р. і 9—11 листопада 2004 р. [1, 2, 6, 7, 12, 13, 29, 58, 79]. Останнім часом багато публікацій присвячено найбільш сильній бурі 24-го циклу сонячної активності, яка мала місце 17—18 березня 2015 р. [36, 38, 40, 43, 45, 48, 49, 52, 54, 55, 62—66, 70, 73, 74, 76, 78, 84, 86—88], а також по-своєму унікальній бурі 7—8 вересня 2017 р. [24, 25, 35, 37, 42, 44, 46, 51, 77, 81, 82]. Помітно менша увага приділялася слабким бурям [16, 26, 31, 34, 53, 57, 59, 61, 75, 85].

Іоносферним бурям присвячено наші роботи [1—8, 11, 14—21, 29—32, 47, 56, 57].

Іоносферна буря — одна зі складових геокосмічної бурі. Зазвичай іоносферна буря супроводжується магнітною бурею, значними збуреннями параметрів нейтральної атмосфери (атмосферною бурею) та електричного поля атмосферного, іоносферного та магнітосферного походження (електричною бурею) [15, 19].

Бурі найсильніше проявляються у високих широтах, менше — на середніх широтах, але ефекти бур спостерігаються навіть в низьких широтах. Розрізняють позитивні та негативні іоносферні бурі (див., наприклад, [15, 19]).

Під час позитивних іоносферних бур концентрація електронів N у F-області іоносфери може збільшуватися в кілька разів, під час негативних іоносферних збурень, навпаки, N в F-області іоносфери може зменшуватися в 10 і більше разів. Крім N , в іоносфері змінюються температури електронів та іонів, швидкість руху плазми, електричне поле і т. д.

Е-область іоносфери схильна до збурень у меншій мірі, ніж F-область іоносфери. Сильно схильна до збурень D-область іоносфери. Під час як позитивних, так і негативних бур, значення N в D-області іоносфери за рахунок висипання з магнітосфери високоенергетичних частинок можуть збільшуватися на 3-4 порядки.

Іоносферні бурі супроводжуються генерацією хвильових збурень в атмосфері, іоносфері та геомагнітному полі в широкому діапазоні періодів.

Під час бур активізується взаємодія різних підсистем у системі СМСМІАЗ [15, 19].

Додамо, що прояви іоносферних бур відрізняються великою різноманітністю [15, 19]. Ці прояви залежать не лише від процесів на Сонці, географічних координат місця спостереження, але й від пори року, часу доби, місцевого часу, стану іоносфери, який передував бурі тощо. [15, 19]. Можна стверджувати, що немає двох подібних геокосмічних бур. Очевидно, що сильна магнітна буря супроводжується сильною іоносферною бурею, а слабка — слабкою. Дивно, що сильна магнітна буря також може супроводжуватися слабкою іоносферною бурею (або її відсутністю) та навпаки [5, 6, 29]. Тому становить значний інтерес детальне вивченняожної нової геокосмічної бурі, зокрема достатньо сильної. Бурі попередніх років описано в низці робіт авторів [1—8, 11, 14—21, 29—32, 47, 56, 57], а також сумовані в монографії [15].

Мета цієї роботи — виклад результатів аналізу магнітоіоносферних ефектів, що супроводжували геокосмічну бурю 21—23 березня 2017 р. Ця буря не належить до унікальних. Їй присвячено лише дві роботи [11, 47]. Основні результати цих робіт такі.

Геокосмічна буря 21—23 березня 2017 р. викликала трифазну негативну іоносферну бурю зі зменшенням критичної частоти f_0F2 шару F2 іоносфери до 40, 20 і 32% і концентрації електронів у максимумі шару F2 до 2, 1.4 і 1.7 раза відповідно. Геокосмічна буря слабо впли-

нула на варіації висоти максимуму шару F2: відносне відхилення цієї висоти не перевищувало 10...15 %. Іоносферна буря супроводжувалась незначним нагрівом плазми: температура електронів збільшувалась у середньому на 250 К, температура іонів слабо змінювалась. Спостерігалось зменшення абсолютноого значення швидкості низхідного потоку плазми 22 березня 2017 р. від 01:33 до 05:30 зі зміною напрямку руху плазми на вихідний на висотах, більших від 250 км. Максимальні відхилення варіацій швидкості, зареєстровані о 03:45 UT, змінювались з висотою від 40 до 13 м/с в діапазоні висот 200...400 км.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Аналіз стану космічної погоди здійснюється з використанням даних, представлених на сайтах [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>].

При фоновому значенні концентрації частинок в сонячному вітрі n_{sw} (1...2) 10^6 м^{-3} 20, 21 та частково 22 березня 2017 р. спостерігалось збільшення n_{sw} до (8...10) 10^6 м^{-3} (рис. 1). Швидкість частинок V_{sw} в сонячному вітрі 21...23 березня 2017 р. збільшилась від 300...400 до 600...700 км/с. У наступні доби мало місце монотонне зменшення V_{sw} від 600 до 400 км/с. Температура частинок T_{sw} в сонячному вітрі 21...24 березня 2017 р. збільшувалась від (0.5...1) 10^5 до (4...5) 10^5 К. Розраховані часові варіації значень теплового тиску частинок p_{sw} в сонячному вітрі в основному повторюють часові варіації $T_{sw}(t)$. Значення p_{sw} 21...23 березня 2017 р. збільшувались від фонового значення порядку 1 нПа до 5 нПа.

Значення B_y - і B_z -компонентів індукції міжпланетного магнітного поля флюктували у межах $\pm(6\ldots7)$ нТл. 21 і 23 березня 2017 р. значення B_z -компонента ставали від'ємними, що свідчило про настання магнітних бур. Раптовий початок першої з них відмічався у першій половині доби 21 березня 2017 р. У другій половині доби приблизно від 11:00 UT до 13:00 UT (тут і далі UT – всесвітній час) спостерігалась головна фаза. Далі аж до 21:00 UT 22 березня 2017 р. реєструвалась фаза відновлення. Від 21:00 UT 22 березня 2017 р. до 03:00 UT 23 березня 2017 р. відмічалась головна фаза другої магнітної бури. Тривалість фази відновлення не перевищувала 12 год.

Розраховані значення енергії, яка інжектується у магнітосферу сонячним вітром за одиницю часу (функції Акасофу A) 21...23 березня 2017 р. збільшувалися від 1 до 5...18 ГДж/с. Майже синхронно з часовими варіаціями $A(t)$ спостерігались варіації K_p -індексу.

21...23 березня 2017 р. значення K_p -індексу від фонового значення, рівного 0...0.3, збільшувались до 4...5.3. Часові варіації K_p -індексу супроводжували часові варіації D_{st} -індексу.

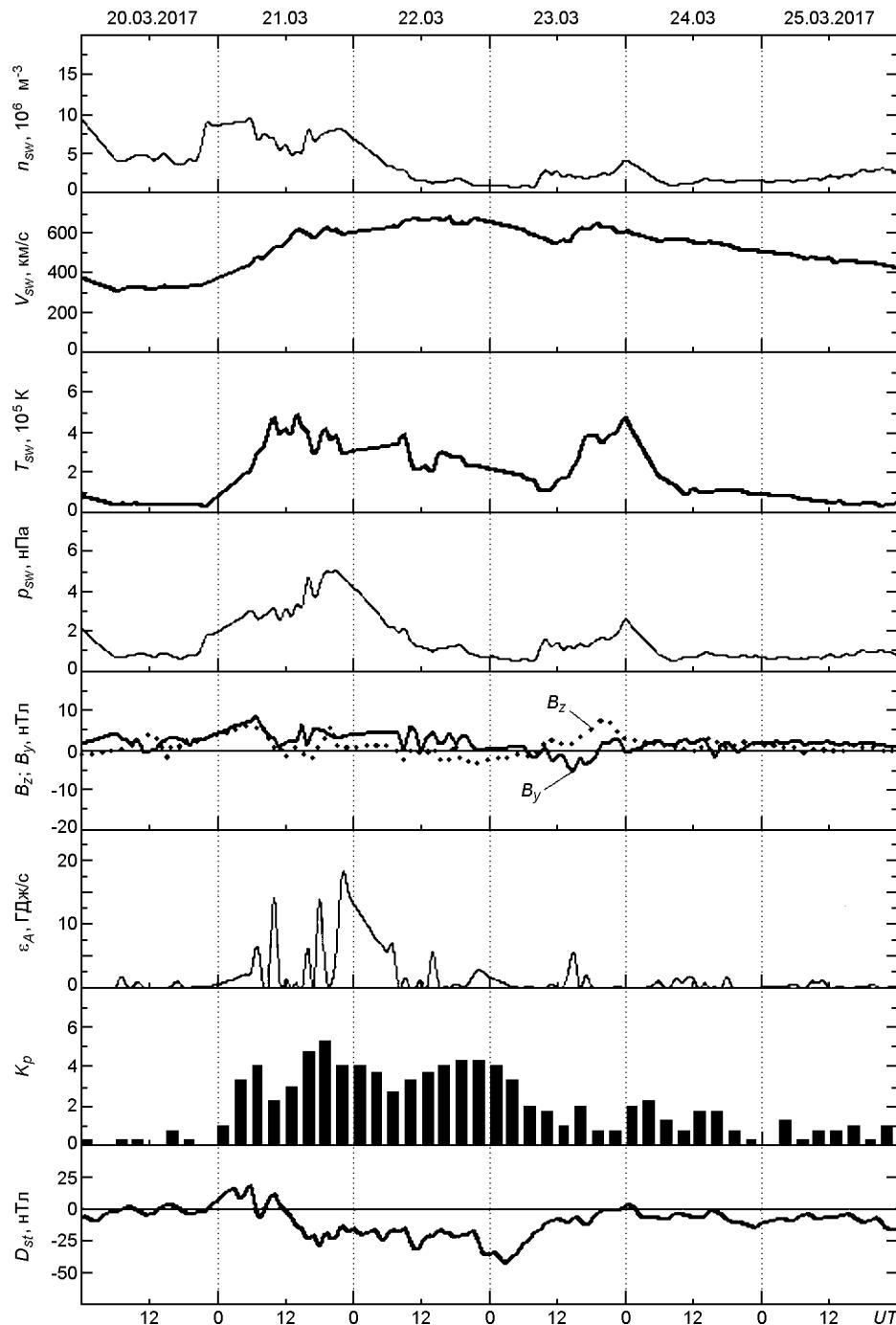


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та температури T_{sw} , розрахованих значень динамічного тиску p_{sw} , B_y - і B_z -складових міжпланетного магнітного поля (дані Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/]), розраховані значення енергії ϵ_A , яка передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу, індекси геомагнітної активності K_p і D_{st} (дані World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/]).

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГЕОКОСМІЧНУ БУРЮ

Автор (див., наприклад, роботу [19]) запропонував індекс G_{st} , який характеризує силу геокосмічної бурі. При цьому

$$G_{st} = 10 \lg \frac{A_{\max}}{A_{\min}},$$

де $A_{\min} = 20$ ГДж/с. Оскільки $A_{\max} = 18$ ГДж/с, індекс $G_{st} = 0.45$ дБ, чому за класифікацією [15, 19] відповідає слабка геокосмічна буря.

ЗАСОБИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Для спостереження ефектів у іоносфері та магнітному полі, викликаних геокосмічною бурею 21...23 березня 2017 р., використовувались такі засоби.

Іонозонд. Несерйний цифровий іонозонд, розроблений в ХНУ імені В. Н. Каразіна, описано в роботі [18]. Іонозонд розташовано в Радіофізичній обсерваторії університету (49°38' пн. ш., 36°20' сх. д.). Потужність радіопередавального пристрою — 1.5 кВт, тривалість імпульсу — 100 мкс, частота повторення імпульсів — 125 Гц, коефіцієнт підсилення антени — 1...10 в залежності від робочої частоти. Частота отримання іонограм — 1 хв⁻¹. Похибка вимірювання частоти — не більше 20 кГц, висоти — не більше 2.1 км.

Допплерівський радар вертикального зондування. Розроблено в ХНУ імені В. Н. Каразіна [18]. Радар розташовано поруч з іонозондом. Основні параметри допплерівського радара: діапазон частот — 1...24 МГц, потужність радіопередавального пристрою — 1 кВт, тривалість зондувального імпульсу — 0.5 мс, частота повторення імпульсів — 100 Гц, смуга пропускання прикінцевого фільтра — 10 Гц, коефіцієнт підсилення вертикальної ромбічної антени — 1...10 в залежності від робочої частоти. Розрізnenня за допплерівським зміщенням частоти (ДЗЧ) — близько 17 мГц. Вимірювання, як правило, ведуться на двох фіксованих частотах — 3.2 і 4.2 МГц. Менша з них ефективна при дослідженні динамічних процесів у E- і F1-шарах, а більша — у F1 і F2-шарах.

Для забезпечення прийнятного розрізnenня по висоті (20...30 км) для кожного відбитого сигналу застосовувалось стробування в діапазоні діючих висот 75...450 км, що відповідало діапазону істинних висот приблизно 75...225 км у денний час і 75...325 км у нічний.

Магнітометр-флюксметр. Прилад призначено для моніторингу варіацій горизонтальних H- і D-компонентів геомагнітного поля. Магнітометр-флюксметр розташовано у Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (49°38' пн. ш., 36°56' сх. д.) [18]. Його основою є індуктивний магнітометр-флюксметр ІМ-II, який виготов-

лявся малою серією в Інституті фізики Землі РАН. Він має високу чутливість (0.5...500 пТл в діапазоні періодів 1...1000 с відповідно) і достатньо широку смугу досліджуваних частот (від 0.001 до 1 Гц). Магнітометр ІМ-ІІ підключено до спеціалізованого мікроконтролерного реєстратора, який виконує оцифрування та попередню фільтрацію на інтервалах 0.5 с магнітометричних сигналів, а також збереження відфільтрованих відліків і часу їхнього отримання в зовнішній USB-флеш-пам'яті. Реєстратор також отримує від приймача GPS-сигналів BR-304 стандартні NMEA-повідомлення з інформацією про поточні дату та час, транслює їх далі на систему пасивного багаточастотного радіозондування, а також кожної доби коригує за ними показання власного енергонезалежного годинника.

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ДАНИХ

Іонограми. Залежності діючої висоти z від частоти спочатку перетворювались в залежності концентрації електронів N від істинної висоти z . Потім будувались часові залежності $N(t)$ для фіксованих висот у діапазоні 140...260 км (рис. 2). Далі за допомогою системного спектрального аналізу [14] оцінювались періоди T та абсолютні амплітуди N_a квазіперіодичних варіацій $N(t)$, а також їхні відносні варіації $N_a = N_a / N$.

Амплітуди відбитого сигналу допплерівського радара. Допплерівський радар реєструє сигнал биттів відбитого та опорного коливань. Стробування відбитого сигналу дозволило отримати часові залежності сигналу биттів для певних висотних діапазонів (рис. 3). Це забезпечило можливість простежити за динамікою амплітуди та висоти відбиття радіохвиль як протягом доби, так і протягом іоносферних бур.

Допплерівські спектри. Застосування до часових варіацій сигналу биттів перетворення Фур'є на інтервалі часу 60 с дозволило побудувати часові залежності допплерівських спектрів (ДС) в діапазоні видимості $-2...+2$ Гц (рис. 4). Далі формувались часові залежності ДЗЧ $f_d(t)$ для основної моди. Потім залежності $f_d(t)$ піддавались системному спектральному аналізу [14] на інтервалі часу 120 хв.

Магнітометричний сигнал. Сигнал на виході магнітометро-флюксметра з урахуванням амплітудно-частотної характеристики приладу перетворювався з сигналу у відносних одиницях у абсолютної (нанотесла). Створювалися часові залежності рівня H - і D -компонентів магнітного поля. Далі ці залежності піддавались системному спектральному аналізу на інтервалі часу від 2 до 14 год у трьох піддіапазонах періодів T , а саме 1...50, 50...200 і 200...1000 с.

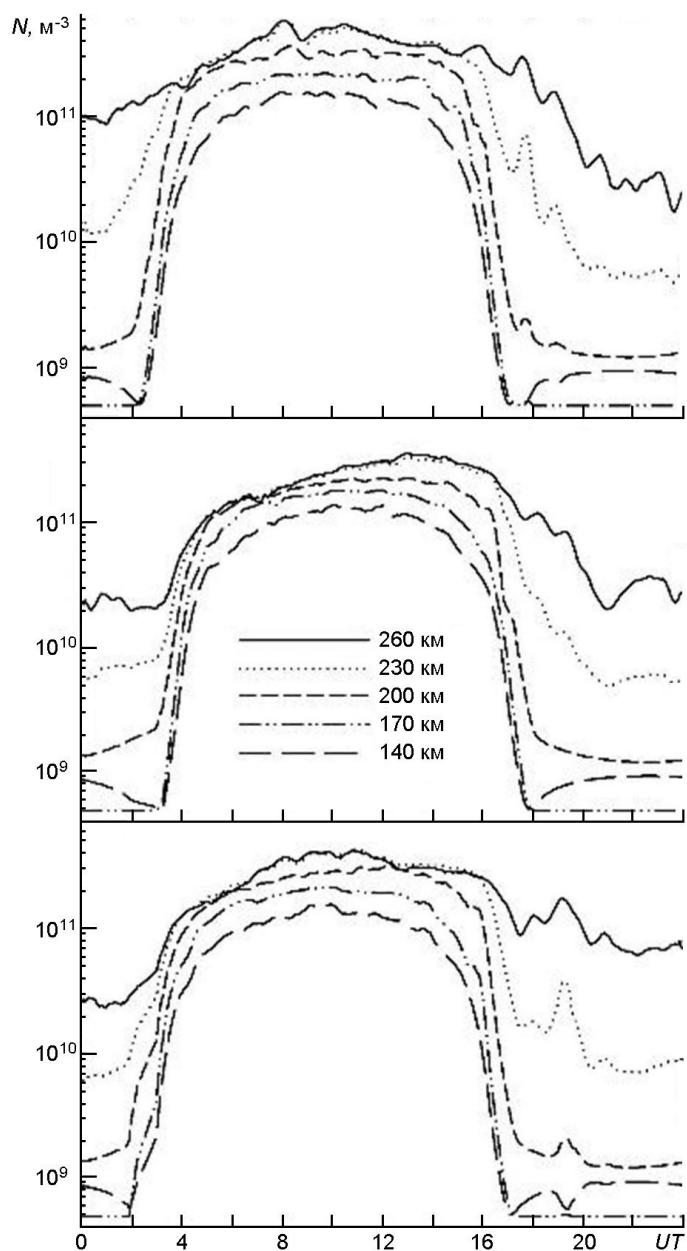


Рис. 2. Часові варіації концентрації електронів 21, 22 і 23 березня 2017 р. (панелі зверху вниз)

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Результати іонозондовых спостережень. З рис. 2 можна бачити, що в ніч з 21 на 22 і з 22 на 23 березня 2017 р. концентрація електронів на висоті 260 км зменшувалась до $N = (2...2.5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Водночас у сусідній ночі з 20 на 21 і з 23 на 24 березня 2017 р. вона становила близько 10^{11} м^{-3} , тобто в 4...5 разів більше. При цьому

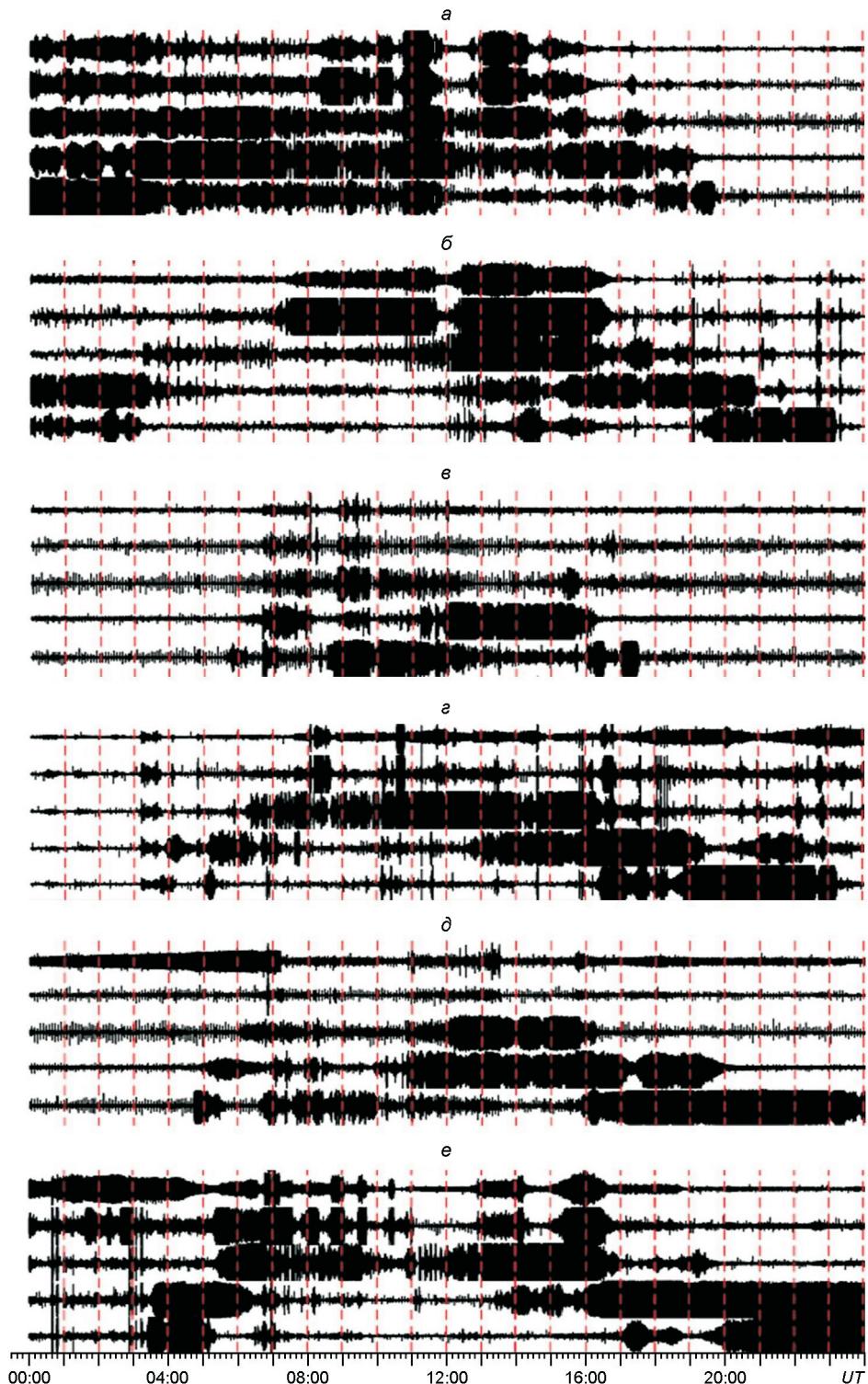


Рис. 3. Часові варіації амплітуди відбитого сигналу допплерівського радара: *a, б* — 21 березня 2017 р.; *в, г* — 22 березня 2017 р.; *д, е* — 23 березня 2017 р. *а, в і д* — частота 4.2 МГц; *б, г і е* — частота 3.2 МГц; записи зверху вниз: діюча висота 75...150, 150...225, 225...300, 300...375, 375...450 км

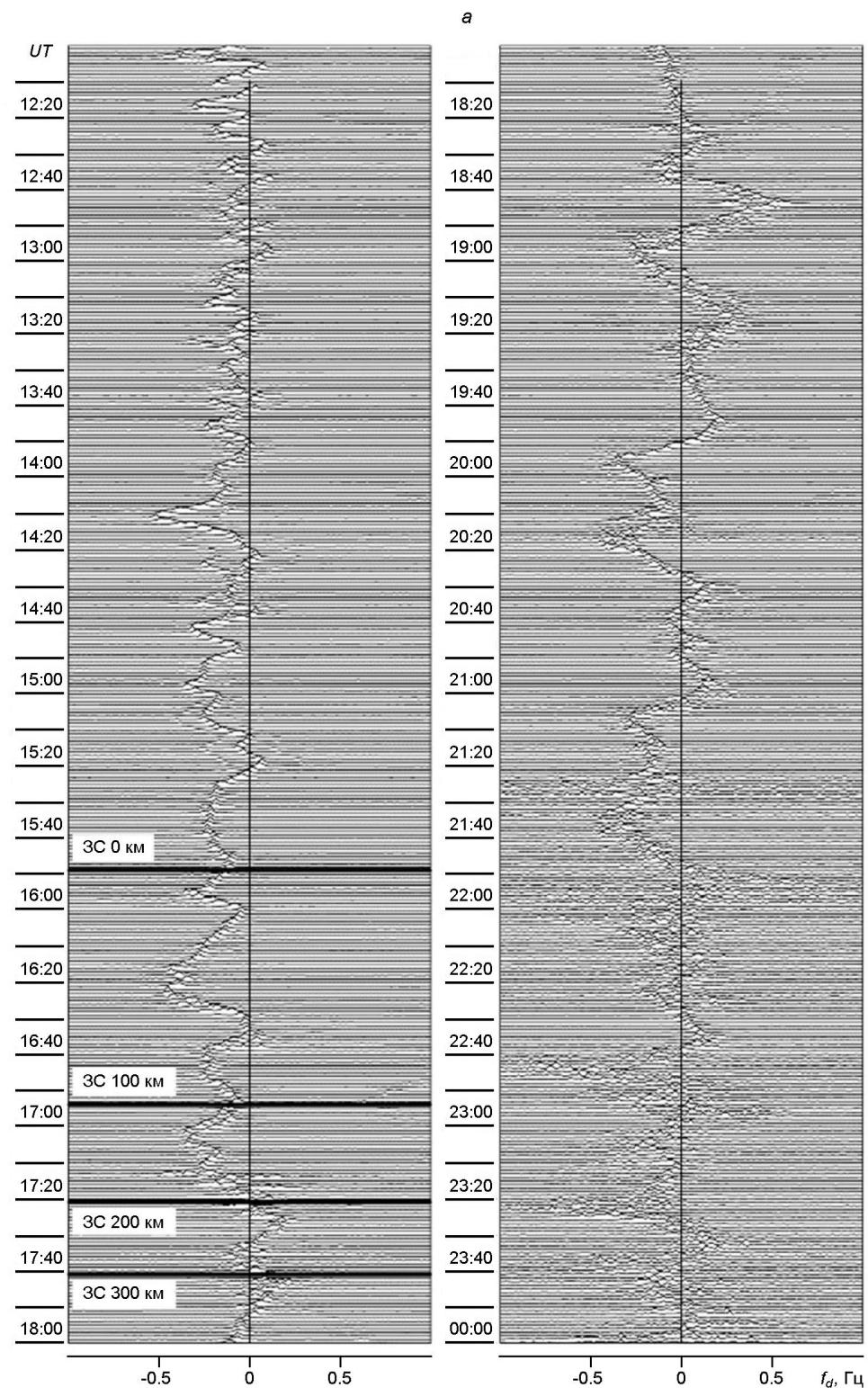


Рис. 4. Часові залежності допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц: а — 20 березня 2017 р. Продовження див. на стор. 64...69 (3С — Захід Сонця)

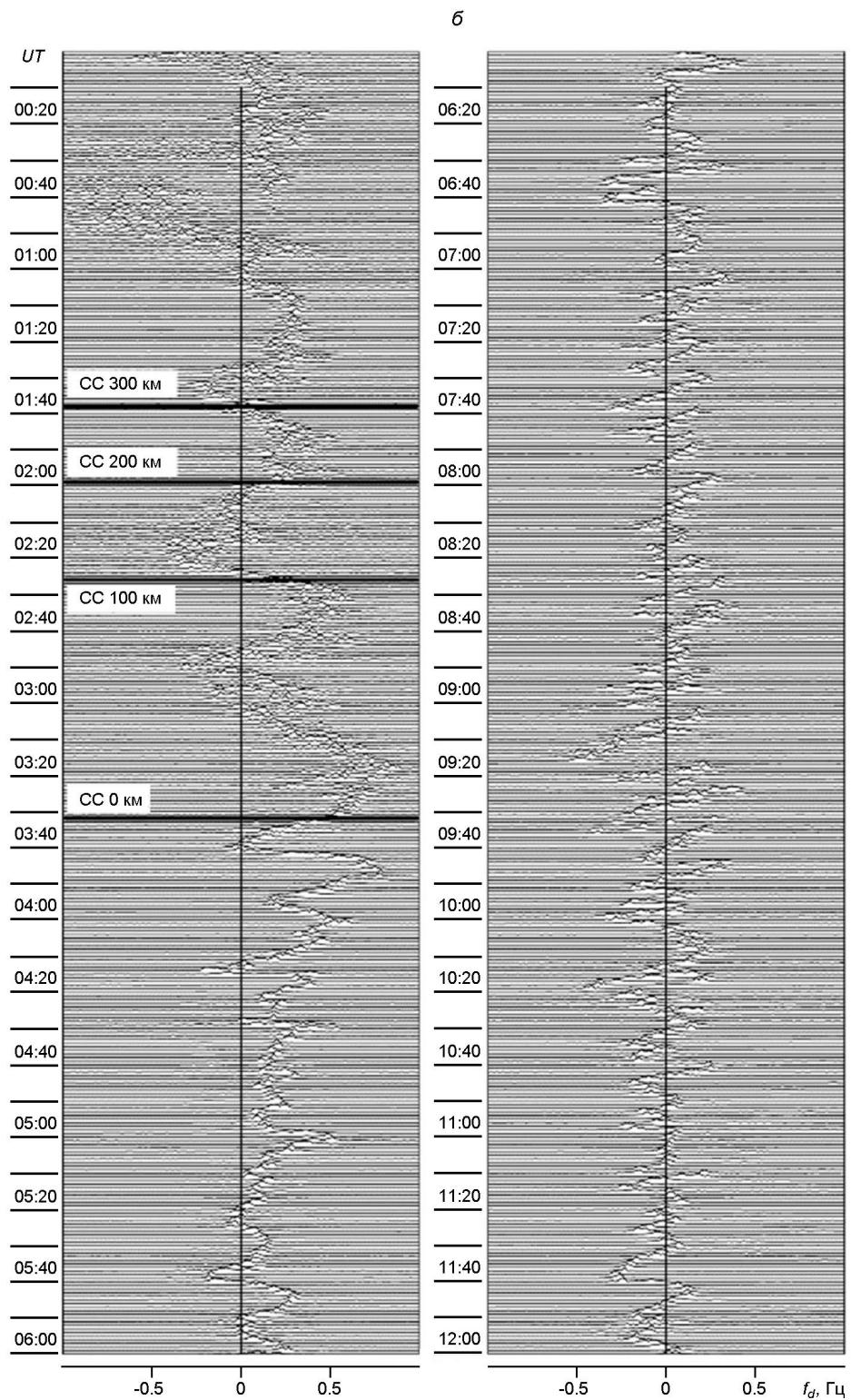


Рис. 4 (продовження): δ — 21 березня 2017 р. (СС — Схід Сонця)

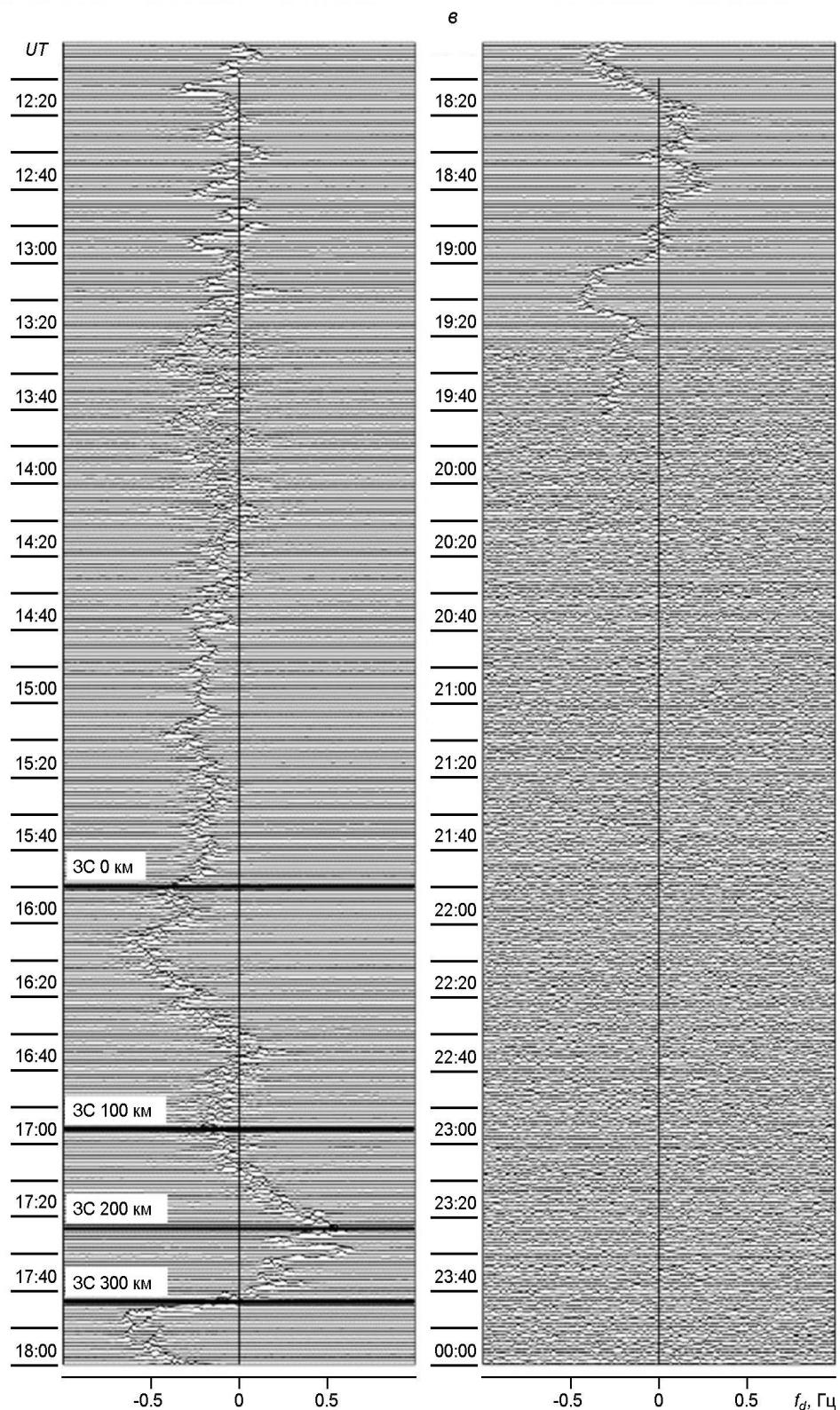


Рис. 4 (продовження): в — 21 березня 2017 р. (ЗС — Захід Сонця)

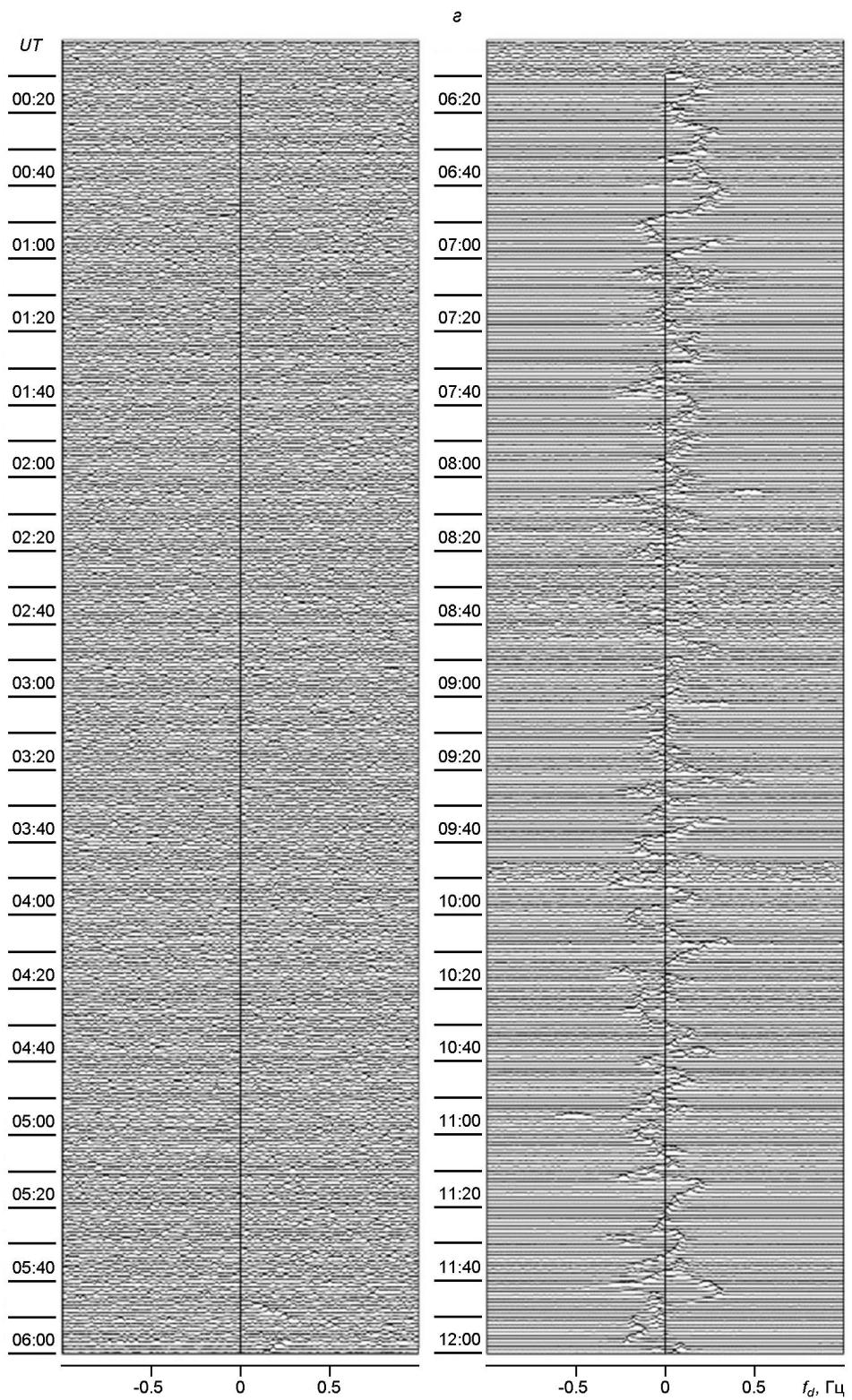


Рис. 4 (продовження): ε — 22 березня 2017 р.

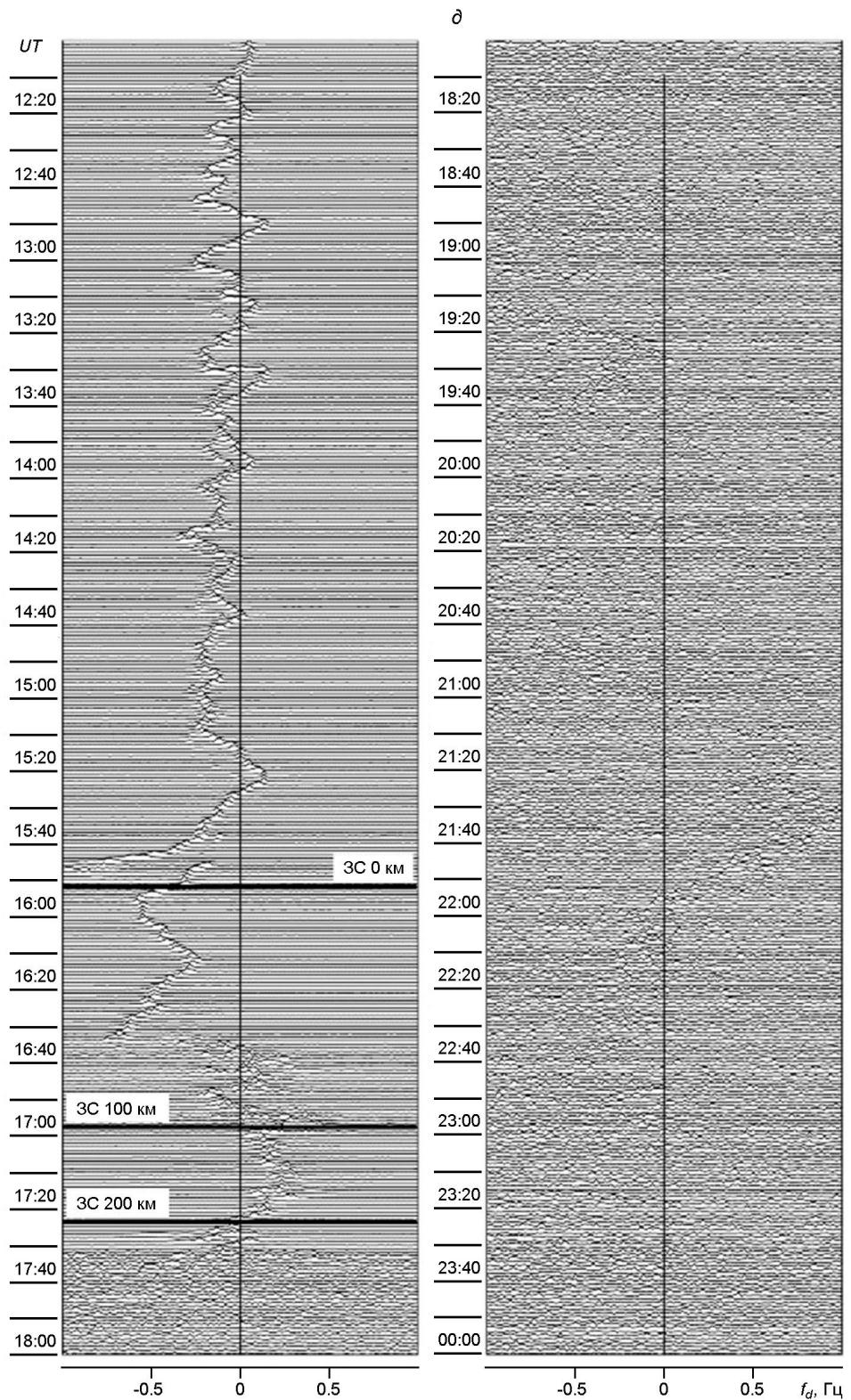


Рис. 4 (продовження): δ — 22 березня 2017 р., (ЗС — Захід Сонця)

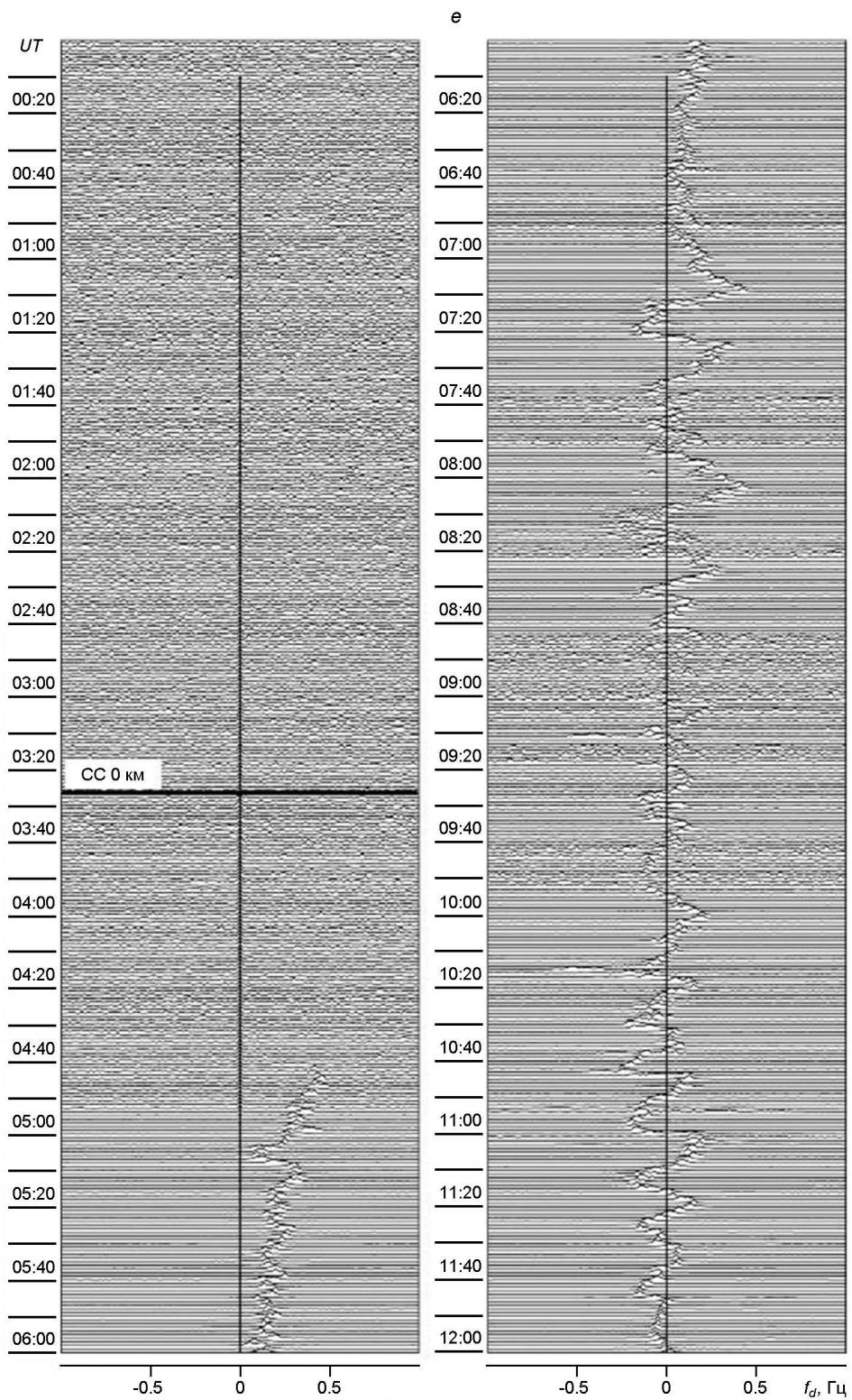


Рис. 4 (продовження): e — 23 березня 2017 р. (СС — Схід Сонця)

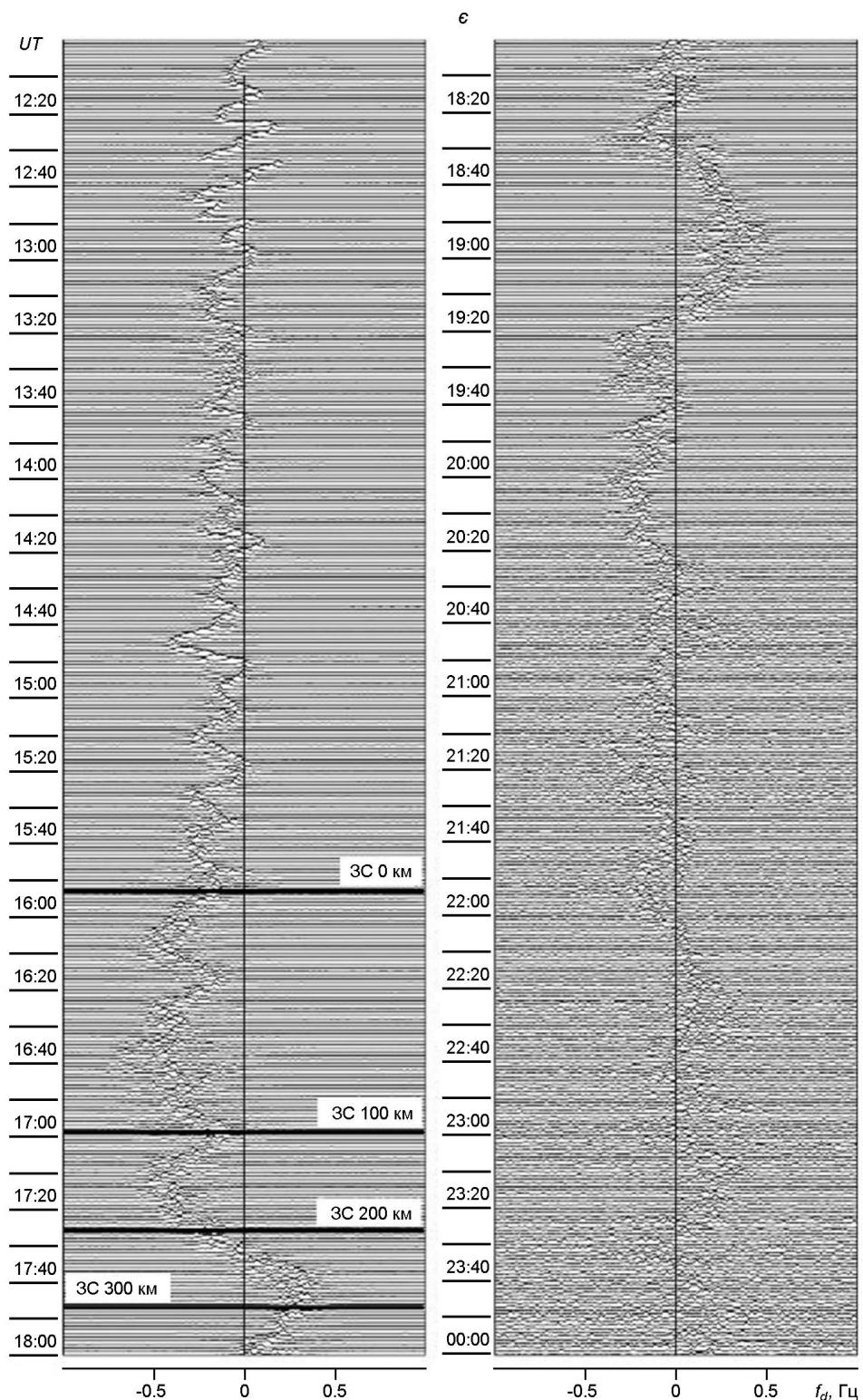


Рис. 4 (закінчення): ϵ — 23 березня 2017 р. (ЗС — Захід Сонця)

$$N = N/N_0 \quad 1 = 0.75 \dots 0.80,$$

або 75... 80 %.

У денний час поблизу опівдня 21 березня 2017 р. $N_0 = 4.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, а 22 березня 2017 р. у цей же час $N = 3.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. При цьому $N_0/N = 1.29$, а $N = 0.22$, або 22 %. Якісно такою ж була і поведінка величини N_0/N і на висотах 200 і 230 км. У нічний час відновлення профілів $N(z)$ на висотах менше 200 км було неможливим.

Зменшення N як у денний, так і в нічний час 21 і 23 березня 2017 р. свідчить про те, що спостерігалось дві негативні іоносферні бурі.

Результати допплерівських спостережень. Спочатку проаналізуємо часові варіації амплітуди відбитого сигналу (рис. 3). З рис. 3 можна бачити, що до настання іоносферної бурі 20 березня 2017 р. від 10:00 до 19:00 UT відбитий сигнал найбільшої амплітуди на частоті 4.2 МГц відповідав діючій висоті $z = 300 \dots 375$ км. Дещо менша амплітуда спостерігалася при $z = 225 \dots 300$ км. Від 20:00 UT до 03:00 UT 21 березня 2017 р. найсильніший сигнал приходив із висот $z = 375 \dots 450$ км. Після 03:00 UT відбиття сигналу відбувалося в діапазоні 225...300 км. I 20 березня, i 21 березня 2017 р. сигнали з меншою амплітудою приходили також із діючих висот 75...150, 150...225 км.

На частоті 3.2 МГц сигнал відбивався переважно від висот $z = 225 \dots 300$ км (до 20:00 UT 20 березня 2017 р.) і 300...375 км (до 04:00 UT 21 березня 2017 р.) (див. рис. 3). В інтервалі часу 04:00...07:00 UT 21 березня 2017 р. відбиття радіохвилі мало місце від діючих висот 225...300 км. Від 07:00 до 16:00 UT 21 березня 2017 р. радіохвилья відбивалася на висотах $z = 75 \dots 150$ км і $z = 150 \dots 225$ км, а від 12:00 до 14:00 UT — також на висотах $z = 225 \dots 300$ км. Приблизно від 15:30 до 21:00 UT 21 березня 2017 р. відбиття відбувалося від висот $z = 300 \dots 375$ км, після 19:00 UT — і від висот $z = 375 \dots 450$ км.

Приблизно після 16:00...17:00 UT 21 березня 2017 р. радіосигнал на обох частотах перестав реєструватися з висот $z = 75 \dots 300$ км. На частоті 4.2 МГц відбитий сигнал перестав реєструватися з усіх висот після 19:40 UT 21 березня 2017 р. Відбиття сигналу відновилося лише після 05:40 UT та продовжувалось до 16:00...17:30 UT 22 березня 2017 р. Спочатку сигнал з'явився в діапазоні висот $z = 375 \dots 450$ км, а потім — і на висотах $z = 225 \dots 375$ км.

На частоті 3.2 МГц відбитий сигнал фіксувався у діапазоні висот $z = 225 \dots 375$ км приблизно з 03:10 UT і до кінця доби 22 березня 2017 р. Після 16:30 UT 22 березня 2017 р. область відбиття поступово зміщувалась від $z = 300 \dots 375$ км до $z = 375 \dots 450$ км.

23 березня 2017 р. відбитий сигнал на частоті 4.2 МГц з'явився приблизно після 04:40 UT в діапазоні висот $z = 375 \dots 450$ км, а потім і в діапазоні висот $z = 300 \dots 375$ км і 225...300 км. Після 16:30 UT область відбиття радіохвилі змістилася з висот $z = 225 \dots 300$ км, а після 20:00 UT — і з висот $z = 300 \dots 375$ км на висоти $z = 375 \dots 450$ км. Від

цих висот відбувалися відбиття до 00:30 UT 24 березня 2017 р. Від 00:30 до 04:00 UT відбиття радіохвилі на частоті 4.2 МГц було повністю відсутнє. Відбитий сигнал з'явився в діапазоні висот $z = 375\dots450$ км лише після 04:00 UT та спостерігався до 20:00 UT.

У ніч з 22 на 23 березня 2017 р. відбитий сигнал на частоті 3.2 МГц був відсутній в інтервалі часу 23:20\dots03:30 UT. Спочатку відбиття відбувалося в діапазоні висот $z = 375\dots450$ км, а потім і в діапазонах $z = 300\dots375$, $225\dots300$ і $150\dots225$ км. Відносно слабкий сигнал епізодично приходив також із висот $z = 75\dots150$ км. Відбиття з висот $z = 225\dots300$ км спостерігалось до 16:30 UT, а від висот $z = 300\dots375$ км — від 16:00 UT 23 березня 2017 р. до 05:30 UT 24 березня 2017 р. Відбитий в діапазоні висот $z = 375\dots450$ км сигнал стійко реєструвався від 19:30 UT 23 березня 2017 р. до 03:30 UT 24 березня 2017 р.

25 березня 2017 р. поведінка добових варіацій амплітуд відбитого сигналу була якісно подібна поведінці амплітуд 20 березня 2017 р.

Далі опишемо часові варіації ДЗЧ. Ці варіації виявилися якісно подібними для частот 3.2 і 4.2 МГц, але на меншій частоті був більший інтервал часу наявності відбитого сигналу. З цієї причини зупинимось далі на часових варіаціях ДС на частоті 3.2 МГц (див. рис. 4).

20 березня 2017 р. у денний час середнє значення ДЗЧ f_d , яке описує відносно повільні процеси в іоносфері, практично не відрізнялось від нуля. Реєструвались квазіперіодичні коливання з періодом $T = 8$ хв і амплітудою $f_{da} = 0.08\dots0.12$ Гц. Приблизно від 13:30 до 17:20 UT $f_d = 0.10$ Гц, квазіперіод епізодично збільшувався від 8 до 20\dots25 хв. Від 18:30 UT 20 березня 2017 р. до 04:30 UT 21 березня 2017 р. f_{da} збільшувалась до 0.3 Гц, а період $T = 15\dots25$ хв. Після 03:00 UT і до 06:00 UT 21 березня 2017 р. $f_d = 0.1\dots0.2$ Гц. Від 06:00 до 15:00 UT $f_d = 0$ Гц, квазіперіодичні коливання ДЗЧ були практично відсутніми, часто відмічався розвал ДС. В інтервалі часу 15:00\dots16:30 UT $f_d = 0.15\dots0.18$ Гц. Від 17:00 і до 21:50 UT 21 березня 2017 р. спостерігались квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T = 5$ хв і $f_{da} = 0.10\dots0.15$ Гц і $T = 30\dots40$ хв і $f_{da} = 0.4\dots0.5$ Гц. В інтервалі часу від 21:50 UT 21 березня 2017 р. до 04:15 UT 22 березня 2017 р. був наявним лише розсіяний сигнал, який супроводжувався аномально великими варіаціями ДЗЧ з $f_{da} = 1.2$ Гц і $T = 50\dots60$ хв. 22 березня 2017 р. від 04:15 UT до 06:40 UT $f_d = 0.08$ Гц. В інтервалі часу 04:15\dots18:50 UT варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з $T = 5\dots7$ хв і $f_{da} = 0.08\dots0.10$ Гц. Від 13:15 до 16:55 UT $f_d = 0.08\dots0.15$ Гц. В інтервалі часу 16:55\dots18:50 UT $f_d = 0$ Гц. Від 19:30 до 20:35 UT 22 березня 2017 р. та від 22:20 22 березня 2017 р. до 03:25 UT 23 березня 2017 р. відбитий сигнал був відсутнім. До 06:35 UT f_d зменшувалось від 0.5 до 0 Гц. У денний час варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з $T = 5\dots6$ хв і $f_{da} = 0.08\dots0.10$ Гц.

Після 14:10 UT період збільшувався до 10...20 хв, а f_{da} — до 0.12 Гц. Від 13:00 до 17:30 UT $\overline{f_d}$ 0.08...0.16 Гц. Від 17:10 до 17:40 UT та від 19:50 UT 23 березня 2017 р. до 03:43 UT 24 березня 2017 р. спостерігався лише розсіяний сигнал. Після 03:43 UT спостерігались варіації DC, типові для ранкового та денного часу.

Результати магнітометричних спостережень. 20 березня 2017 р. часові варіації горизонтальних складових геомагнітного поля найчастіше не перевищували ± 0.5 нТл, епізодично досягаючи ± 1 нТл (рис. 5). Максимальну амплітуду мали складові в діапазоні періодів 700...900 с для D-компоненти та 550...750 с для H-компоненти.

21 березня 2017 р. приблизно до 02:40 UT флюктуації рівня компонентів не перевищували ± 0.5 нТл. В інтервалі часу 02:40...11:00 UT вони істотно збільшилися від ± 2 до $\pm(5\ldots 6)$ нТл. Флюктуації рівня до $\pm(4\ldots 6)$ нТл мали місце до початку наступної доби. Період складових з переважною енергією збільшився до 600...800 с для D-компоненти та 650...850 с для H-компоненти.

Протягом доби 22 березня 2017 р. розмах флюктуацій зазвичай не перевищував ± 2 нТл, лише епізодично він збільшувався до $\pm(4\ldots 5)$ нТл. Період складав 700...900 с для обох компонентів.

23 березня 2017 р. рівень геомагнітного поля найчастіше флюктуував у межах $\pm(0.5\ldots 1)$ нТл, іноді досягаючи значень $\pm(1.5\ldots 3)$ нТл. Період T 650...850 с для обох компонентів.

24 березня 2017 р. рівень флюктуацій рідко перевищував значення $\pm(0.5\ldots 1)$ нТл. Епізодично амплітуда зростала до $\pm(1\ldots 2)$ нТл. При цьому період змінювався від 740 до 940 с для D-компоненти та від 450 до 650 с для H-компоненти.

25 і 26 березня 2017 р. рівень геомагнітного поля, найчастіше, флюктуував у межах ± 0.5 нТл. В окремі інтервали часу він досягав $\pm(1\ldots 2)$ нТл. Період коливань змінювався від 400 до 600 с для D-компонента та від 550 до 750 с для H-компонента.

ПРИКЛАД РЕЗУЛЬТАТИВ СИСТЕМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Розглянемо результати спектрального аналізу рівня H-компоненти для інтервалу часу 02:00...14:00 UT 21 березня 2017 р., який охоплює раптовий початок магнітної бурі та частину її головної фази (рис. 6). Із рис. 6 можна бачити, що у спектрі переважали коливання з періодом 300...430 с і 600...850 с.

Узагальнення результатів системного спектрального аналізу наведено у таблиці. З таблиці видно, що у першому піддіапазоні з $T = 1\ldots 50$ с за відносно спокійного магнітного поля переважний період становив приблизно 35...45 с, а під час геокосмічної бурі він зменшувався до 30...40 с. Цей період пов'язаний з коливаннями магнітної силою трубки у місці спостереження. Амплітуда цих коливань най-

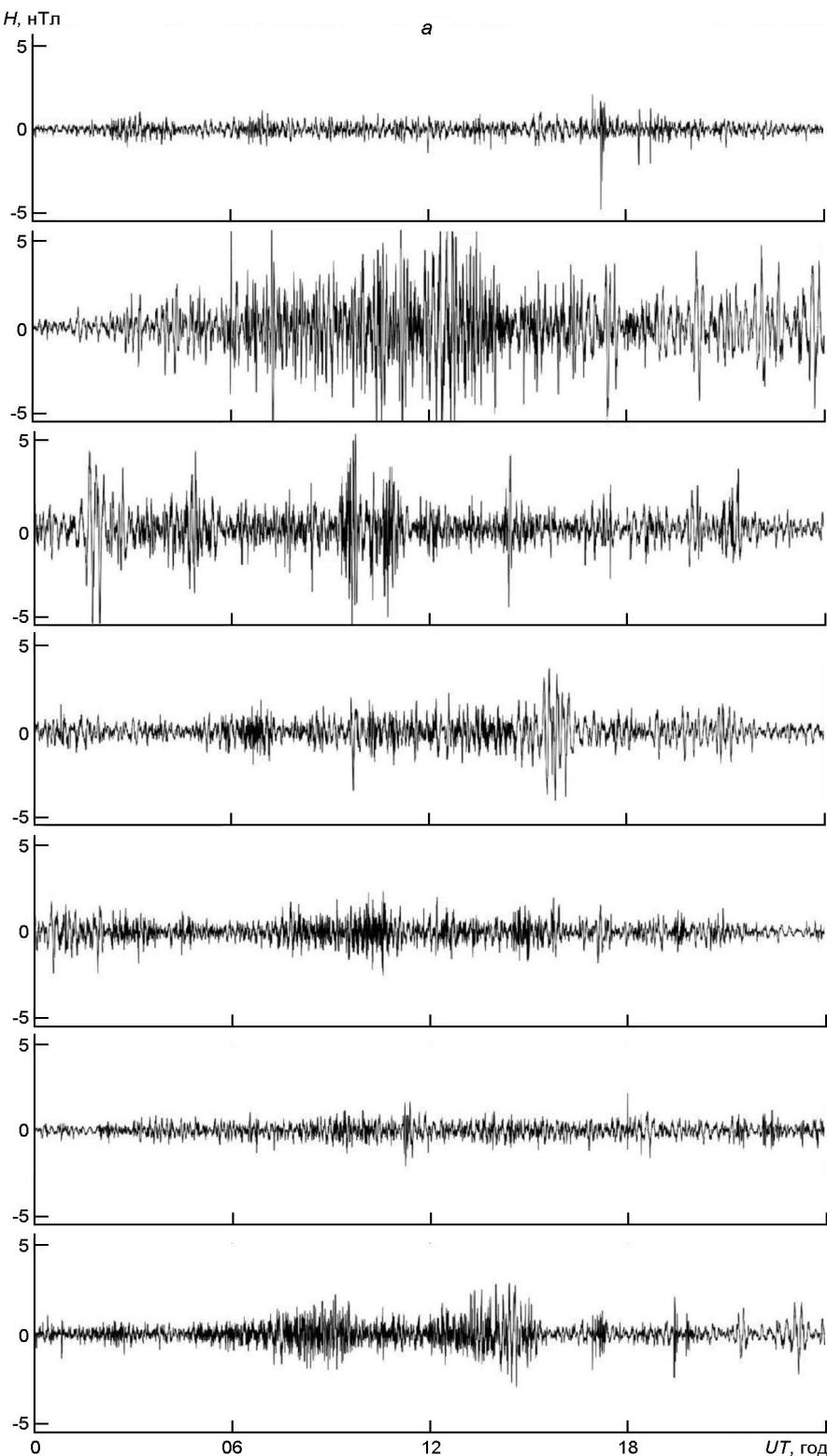


Рис. 5. Часові варіації горизонтальних компонентів геомагнітного поля: а — H -компонент. Панелі зверху вниз — 20...26 березня 2017 р. відповідно (закінчення див. на наступній сторінці)

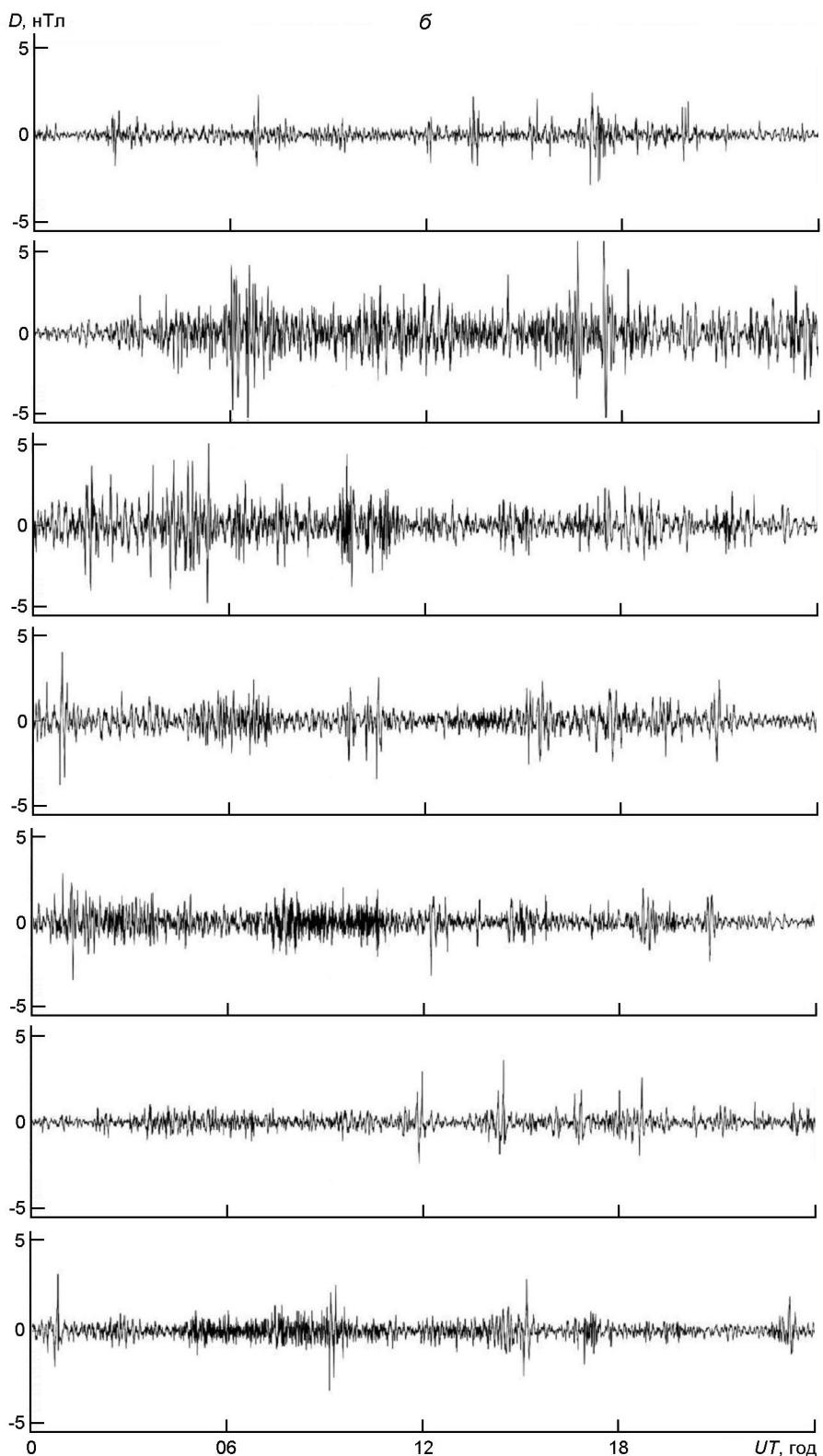


Рис. 5 (закінчення): б — D -компонент. Панелі зверху вниз — 20...26 березня 2017 р. відповідно

Таблиця 1. Рівень і головні періоди коливань у флюктуаціях геомагнітного поля під час бурі

Дата, 2017 р.	UT	<i>D</i> -компонент		<i>H</i> -компонент	
		Рівень, нТл	Період, с	Рівень, нТл	Період, с
20 березня	00:00...	0.3...0.6	42±5; 90±20; 120±25	0.3...0.5	40±5; 90±20; 170±25
	12:00		420±100; 820±100		
	00:00...			350±100; 650±100	
	12:00				
21 березня	03:00...	2...5	35±5; 165±25	2...5	37.5±5; 165±25
	21:00		350±50; 700±100		
	03:00...			320±50; 750±100	
	15:00				
22 березня	00:00...	2...4	42.5±5; 180±25	2...5	24±5; 45±5; 160±25
	12:00		830±100		
	00:00...			260±25; 820±100	
	12:00				
23 березня	00:00...	1...2.5	42.5±5; 160±25	1...3	37.5±5; 165±25
	12:00		460±25; 750±100		
	08:00...			750±100	
	18:00				
24 березня	00:00...	1...1.5	42.5±5; 70±15; 75±25	1...1.5	42.5±5; 65±15; 150±25
	12:00		350±50; 840±100		
	00:00...			550±100	
	12:00				
25 березня	11:00...	0.5...1.5	42.5±5; 175±25	0.3...1	42±5; 180±25; 600±100
	20:00		700±100		
	00:00...			0.3...1	42±5; 180±25; 600±100
	12:00				
26 березня	09:00...	0.5...1.5	42.5±5; 100±20; 160±25;	0.5...1.5	42.5±5; 100±20; 155±25
	16:00		480±100		
	06:00...			380±100; 650±100	
	18:00				

менша. Зменшення періоду під час бурі викликається деформацією, точніше — стисканням магнітних силових ліній. У другому піддіапазоні (50...200 с) у спокійних умовах переважно $T = 80 \dots 100$ с і $T = 150 \dots 200$ с. Під час бурі $T = 140 \dots 190$ с. Найбільшу амплітуду мали коливання з періодами $T = 600 \dots 900$ с, дещо меншу — коливання з періодами від 300 до 400 с.

ОБГОВОРЕННЯ

Іоносферні бури. Як видно з рис. 2, зменшення концентрації електронів спостерігалось двічі: приблизно від 18:00 UT 21 березня 2017 р. до

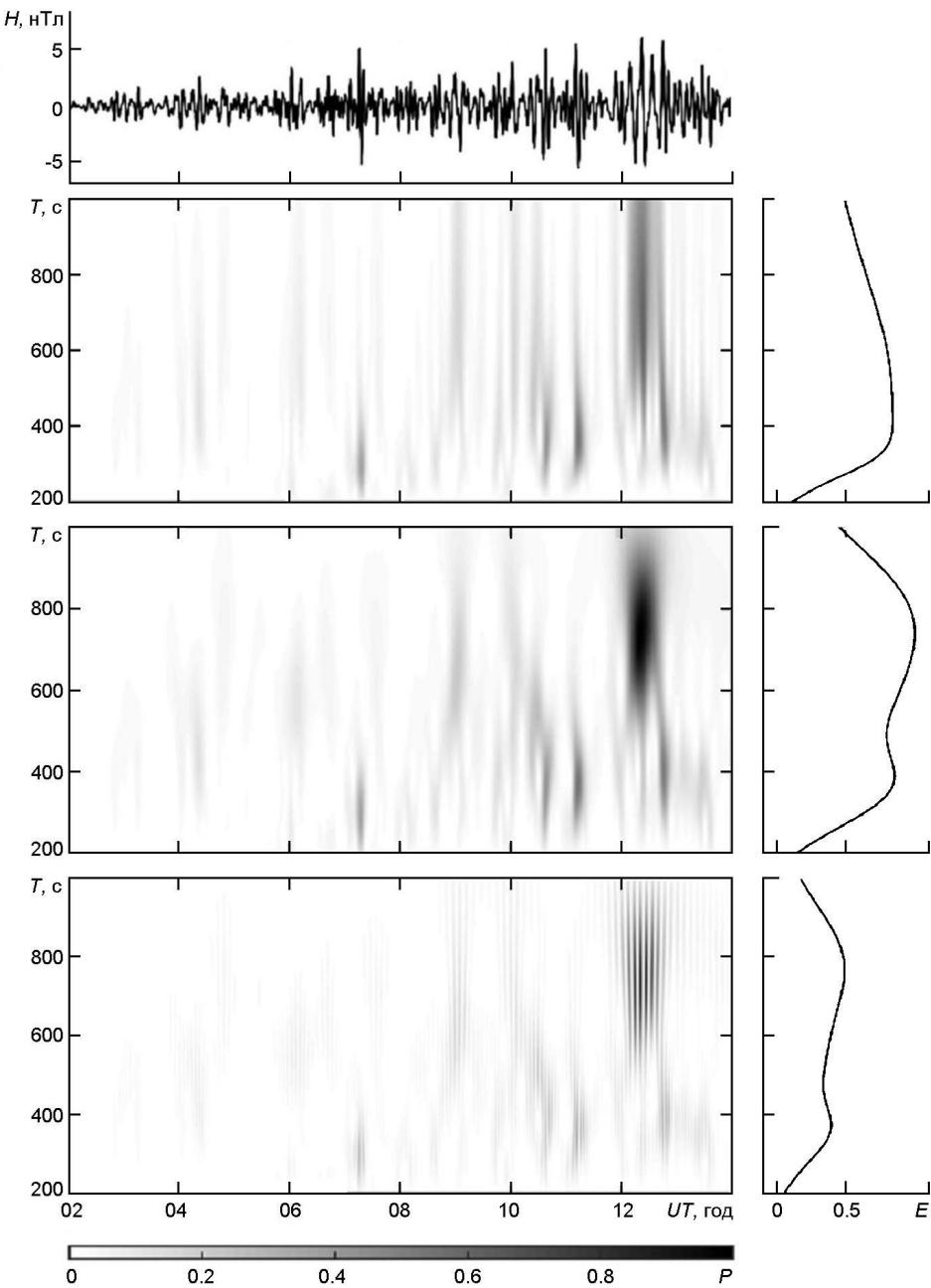


Рис. 6. Результати смугової фільтрації та системного спектрального аналізу часових варіацій рівня H -компоненти для інтервалу часу 02:00...14:00 UT 21 березня 2017 р. Панелі зверху вниз: хвильова форма, результати віконного, адаптивного перетворень Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч показано енергограми

13:00 UT 22 березня 2017 р. і від 15:00 UT 22 березня 2017 р. до 07:00 UT 23 березня 2017 р. Обидві іоносферні бурі були негативними. Обчислимо індекс негативної іоносферної бурі [15, 19]:

$$I_{NIS} = 10 \lg \frac{N_0}{N_{\min}},$$

де N_0 і N_{\min} — значення концентрації електронів у максимумі F-області іоносфери у незбурених і збурених умовах. При $N_0/N_{\min} = 4\dots 5$ вночі та $N_0/N_{\min} = 1.29$ вдень отримаємо відповідно $I_{NIS} = 6\dots 7$ і 1.1. Згідно з класифікацією [15, 19] у нічний час мала місце дуже сильна іоносферна буря, а в денний час відмічалося лише слабке іоносферне збурення.

Негативні іоносферні бурі призвели до зміщення вгору на десятки кілометрів області відбиття радіохвиль. З цієї причини протягом досить тривалого часу відбитий сигнал не спостерігався навіть на частоті 3.2 МГц.

Іоносферні бурі порівняно слабо вплинули на ДС та ДЗЧ. Більш суттєвими були добові варіації ДЗЧ. За декілька годин до заходу Сонця на рівні Землі ДЗЧ f_d ставало від'ємним, а після сходу Сонця на висотах іоносфери — додатним. На повільні добові варіації f_d накладалися квазіперіодичні коливання ДЗЧ. У денний час період $T = 5\dots 8$ хв, $f_{da} = 0.1$ Гц, а в нічний час він збільшувався до 15...25 хв, а $f_{da} = 0.15\dots 0.30$ Гц.

Відносну амплітуду квазіперіодичних варіацій N оцінимо, виходячи зі співвідношення [15, 19]:

$$N_a = \frac{cT}{4L} \frac{f_{da}}{f}, \quad (1)$$

де c — швидкість світла в вакуумі, L — товщина іоносферного шару, який дає основний внесок в ДЗЧ.

У денний час при $T = 5$ хв і $f_{da} = 0.08\dots 0.12$ Гц з (1) при $L = 30$ км маємо $N_a = 0.6\dots 0.9$ %. У нічний час при $T = 20$ хв і $f_{da} = 0.15\dots 0.30$ Гц отримаємо $N_a = 4.5\dots 9$ %.

Магнітна буря. Перша магнітна буря розпочалась поблизу опівдня 21 березня 2017 р., яка тривала до кінця доби 22 березня 2017 р. Ще до закінчення першої бурі в ніч з 22 на 23 березня 2017 р. почалась друга буря, яка закінчилась у ніч з 23 на 24 березня 2017 р.

Оцінимо енергію обох бур, виходячи зі співвідношення [41]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_m \frac{|D_{st \min}^*|}{B_0},$$

де $E_m = 8 \cdot 10^{17}$ Дж — енергія дипольного магнітного поля Землі, $B_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл — значення індукції магнітного поля на екваторі,

$$D_{st}^* = D_{st} / bp_{sw}^{1/2} / c.$$

Тут $b = 5 \cdot 10^5$ нТл/(Дж м³)^{1/2}, $c = 20$ нТл, p_{sw} — динамічний тиск сонячного вітру.

Для першої бурі $D_{st} = 30$ нТл, $p_{sw} = 5$ нПа, а $D_{st}^* = -45$ нТл, $E_{ms} = 1.8 \cdot 10^{15}$ Дж. За тривалості головної фази $T = 7$ год маємо середню потужність $P_{ms} = 71$ ГВт.

Для другої бурі $D_{st} = 40$ нТл, $p_{sw} = 1$ нПа, а $D_{st}^* = -36$ нТл, $E_{ms} = 1.44 \cdot 10^{15}$ Дж. При $T = 6$ год отримаємо $P_{ms} = 67$ ГВт.

За класифікацією [15, 19] перша магнітна буря належить до помірних, а друга — до вельми помірних.

Під час магнітних бур рівень флюктуацій горизонтальних компонентів збільшувався приблизно від ± 0.5 до ± 5 нТл. Також помітно змінювався й спектральний склад флюктуацій: період переважних складових збільшувався від 500...900 до 900...1000 с.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Геокосмічна буря, енергія за одиницю часу якої сягала 18 ГДж/с, спостерігалась 21...23 березня 2017 р. За своєю інтенсивністю буря належить до слабких.

2. Геокосмічна буря супроводжувалась слабким іоносферним збуренням у денний час і сильною іоносферною бурею в нічний час. Концентрація електронів при цьому зменшувалась в 1.3 та 4...5 разів відповідно.

3. Геокосмічна буря також супроводжувалась двома помірними магнітними бурями з енергією порядку 10^{15} Дж і потужністю 70 ГВт.

4. Під час магнітних бур рівень флюктуацій горизонтальних компонентів у діапазоні періодів 100...1000 с збільшувався від ± 0.5 до ± 5 нТл. При цьому суттєво змінювався спектр флюктуацій.

Дослідження Л. Ф. Чорногора та Y. Luo проведено в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»). Робота Л. Ф. Чорногора підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 і 0122U001476).

- Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений. *Космична наука і технологія*. 2007. 13, № 4. С. 62—76.
- Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение. *Космична наука і технологія*. 2007. 13, № 4. С. 77—90.
- Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2003.

- № 9. С. 57—94.
4. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. 45, № 6. С. 789—802.
 5. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1. *Космічна наука і технологія*. 2007. 13, № 5. С. 58—76.
 6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2. *Космічна наука і технологія*. 2007. 13, № 5. С. 77—96.
 7. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7—10 ноября 2004 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. 47, № 6. С. 761—779.
 8. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф., Черняев С. В. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. 45, № 6. С. 803—823.
 9. Данилов А. Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор). *Гелио-геофизические исследования*. 2013. 5. С. 1—33.
 10. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. 25, № 5. С. 705—721.
 11. Емельянов Л. Я., Кацко С. В., Черногор Л. Ф. 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). С. 78 — 85.
 12. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Проявления геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. 47, № 5. С. 646—658.
 13. Птицына Н. Г., Данилова О. А., Тясто М. И., Сдобнов В. Е. Динамика жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время разных фаз бури 20 ноября 2003 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. 61, № 2. С. 160—171.
 14. 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.
 15. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь: Монография*. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
 16. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Zheng Yu. Эффекты сильной ионосферной бури 26 августа 2018 г.: результаты многотрассового радиофизического мониторинга. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. 61, № 1. С. 66—84.
 17. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Широтная зависимость квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 7—9 сентября 2017 года. *Космічна наука і технологія*. 2020. 26, № 2. С. 72—83.
 18. 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. *Космічний проект «Іоносат-Мікро»*. К.: Академпериодика, 2013. С. 160—182.
 19. Чорногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 1 (128). С. 3—77. DOI: 10.15407/knit2021.01.003

20. Чорногор Л. Ф. Статистичні характеристики геомагнітних бур у 24-ому циклі сонячної активності. *Кінематика і фізика небесних тіл.* 2021. 37, № 4. С. 49—59. DOI: 10.15407/kfnt2021.04.049
21. Чорногор Л. Ф., Голуб М. Ю., 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. С. 69—77. DOI: 10.26565/2311-0872-2020-33-06
22. Ярюкович Ю. В., Перевалова Н. П., Едемский И. К., Полякова А. С. *Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография.* Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 259 с.
23. Blagoveshchensky D. V. Effects of geomagnetic storms in the low-latitude ionosphere. *Cosmic Res.* 2020. 58, Is. 4. P. 234—241. DOI: 10.1134/s0010952520040024
24. Blagoveshchensky D. V., Sergeeva M. A. 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. DOI: 10.1016/j.asr.2018.07.016
25. Blagoveshchensky D. V., Zhbankov G. A., Maltseva O. A. 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. P. 881—892. DOI: 10.1007/s11141-019-09944-3
26. Bolaji O. S., Fashae J. B., Adebiyi S. J., Owolabi C., Adebeyi B. O., Kaka R. O., Jewel Ibanga, Abass M., Akinola O. O., Adekoya B. J., 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, Is. 8. Paper no. e2020JA029068 DOI: 10.1029/2020JA029068
27. Bothmer V., Daglis I. *Space Weather: Physics and Effects.* Springer-Verlag New York, 2007. 438 p. ISBN 3-642-06289-X.
28. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — A Review. *Space Science Reviews.* 1999. 88. P. 563—601. DOI: 10.1023/A:1005107532631
29. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2007. 7. id. GI3001. DOI: 10.1029/2005GI000125
30. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., 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, Is. 2. P. 226—242. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.037
31. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T. 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. Pp. 151—156. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9576010
32. Chernogor L. F., Zheng Y., Guo Q., Luo Y., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Features of Ionospheric and Magnetic Effects of August 5—6, 2019 Noticeable Geospace Storm Over China and Ukraine. *Problems of Geocosmos — 2020.* 2022. Chapter 28. Springer Nature Switzerland AG. P. 379—396.
33. D'Angelo G., Piersanti M., Alfonsi L., Spogli L., Clausen L. B. N., 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. P. 638—650. DOI: 10.1016/j.asr.2018.05.005
34. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Inter. J. Geomagn. Aeron.* 2001. 2, N 3. P. 209—224.

35. Despirak I. V., Kleimenova N. G., Gromova L. I., Gromov S. V., Malysheva L. M. Supersubstorms during storms of September 7—8, 2017. *Geomagn. Aeron.* 2020. 60, Is. 3. P. 292—300. DOI: 10.1134/S0016793220030044
36. Dmitriev A. V., Suvorova A. V., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Rakhmatulin R. A., Parkhomov V. A. 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. P. 2398—2423. DOI: 10.1002/2016JA023260
37. Fejer B. G., Navarro L. A., Sazykin S., Newheart A., Milla M. A., Condor P. Prompt penetration and substorm effects over Jicamarca during the September 2017 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2021. 126, Is. 8. Paper № e2021JA029651. DOI: 10.1029/2021JA029651
38. 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, Is. 1. P. 111—121. DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.008
39. 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. Geophysical monograph series.* 98. American Geophysical Union, Washington, D.C, 1998. P. 203—226. DOI: 10.1029/GM098.
40. Ghodpage R. N., Patil P. T., Gurav O. B., Gurubaran S., Sharma A. K. 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, Is. 3. P. 624—637. DOI: 10.1016/j.asr.2018.05.003
41. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasylunas V. M. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. 99, Is. A4. P. 5771—5792. DOI: 10.1029/93JA02867
42. 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, Is. 2. P. 359—372. DOI: 10.5194/angeo-38-359-2020
43. Jiang C., Yang G., Liu J., Yokoyama T., Liu T., Lan T., Zhou C., Zhang Y., Zhao Z., Komolmis T., Supnithi P., Yatini C. Y. 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. P. 5756—5767. DOI: 10.1002/2017JA024134
44. 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. P. 9381—9404. DOI: 10.1029/2019JA026590
45. 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. P. 613—626. DOI: 10.1007/s00190-016-0988-4
46. Jonah O. F., Coster A., Zhang S., Goncharenko L., Erickson P. J., de Paula E. R., Kherani E. A. TID observations and source analysis during the 2017 memorial day weekend geomagnetic storm over North America. *J. Geophys. Res.* 2018. 123, № 10. P. 8749—8765. DOI: 10.1029/2018JA025367
47. Katsko S. V., Emelyanov L. Y., Chernogor L. F. 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. P. 01—04. DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560587
48. Kumar S., Kumar V. V. 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. P. 584—602. DOI: 10.1029/2018JA025674

49. Kumar V. V., Parkinson M. L. A Global Scale Picture of Ionospheric Peak Electron Density Changes during Geomagnetic Storms. *Space Weather*. 2017. 15, № 4. P. 637—652. DOI: 10.1002/2016SW001573
50. Laštovička J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. 58, N 7. P. 831—843. DOI: 10.1016/0021-9169(95)00106-9
51. 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, Is. 4. P. 3217—3232. DOI: 10.1029/2017JA025166
52. Li S. Temporal evolution analysis of storm-enhanced density during an intense magnetic storm on March 2015. *Adv. Space Res.* 2021. 67, Is. 5. P. 1570—1579. DOI: 10.1016/j.asr.2020.12.004
53. Lissa D., Srinivasu V.K.D., Prasad D.S.V.V.D., Niranjan 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, Is. 6. P. 1427—1440. DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.025
54. 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. P. 2301—2312. DOI: 10.1016/j.asr.2017.02.021
55. Liu J., Zhang D.-H., Coster A. J., 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. P. 673—687. DOI: 10.5194/angeo-37-673-2019
56. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., 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, is. 4. DOI: 10.5194/angeo-39-657-2021
57. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. М. Ефекти геокосмічної 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>
58. Mannucci A. J., Tsurutani B. T., Iijima B. A., Komjathy A., Saito A., Gonzalez W. D., Guarneri F. L., Kozyra J. U., Skoug R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29—30, 2003 “Halloween storms”. *Geophys. Res. Lett.* 2005. 32. id. L12S02. DOI: 10.1029/2004GL021467
59. Mansilla G. A., Zossi M. M. Longitudinal variation of the ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm at equatorial/low latitudes. *Pure Appl. Geophys.* 2020. 177, Is. 12. P. 5833—5844. DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1
60. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959. 64, Is. 4. P. 305—321. DOI: 10.1029/JZ064i003p00305
61. Ngwira C. M., Habarulema J.-B., Astafyeva E., Yizengaw E., Jonah O. F., 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. P. 7123—7139. DOI: 10.1029/2018JA026172
62. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Yu. M., Figurski M. Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors*. 2017. 17, № 10. Article no. 2298. DOI: 10.3390/s17102298
63. Olwendo O. J., 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, Is. 8. P. 1817—1826. DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.037
64. Paul B., De B. K., Guha A. Latitudinal variation of F-region ionospheric response during three strongest geomagnetic storms of 2015. *Acta Geodaetica et Geophysica.* 2018. 53, № 4. P. 579—606. DOI: 10.1007/s40328-018-0221-4
65. 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. P. 1807—1816. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.021
66. 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. DOI: 10.1016/j.asr.2017.09.030
67. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics.* Edited by H. Volland. CRC Press, Roca Raton, Fla, 1995. 2. P. 195—248.
68. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere // In ed. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. *Magnetic storms. Geophysical monograph series.* 98. American Geophysical Union, Washington, D.C, 1998. P. 249—290.
69. Prölss G. W., Jung M. J. Travelling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1978. 40, Is. 12. P. 1351—1354. DOI: 10.1016/0021-9169(78)90088-0
70. Ray S., Roy B., Paul K. S., 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. P. 2551—2563. DOI: 10.1002/2016JA023127
71. Rubtsov A. V., Maletckii B. M., Danilchuk E. I., Smotrova E. E., Shelkov A. D., Yasyukevich A. S. Ionospheric disturbances over eastern Siberia during April 12-15, 2016 geomagnetic storms. *Sol.-Terr. Phys.* 2020. 6, Is. 1. P. 60—68. DOI: 10.12737/STP-61202007
72. 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, Is. 7. Paper № 110. DOI: 10.1007/s10509-020-03828-z
73. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Y., 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
74. Shreedevi P. R., Choudhary R. K., Thampi Smitha V., Yadav Sneha, Pant T. K., Yu Yiqun, McGranaghan Ryan, Thomas Evan G., Bhardwaj Anil, Sinha A. K. 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. Paper № e2019SW002383. DOI: 10.1029/2019SW002383
75. Spogli L., Sabbagh D., Regi M., Cesaroni C., Perrone L., Alfonsi L., Mauro D. Di, Lepidi S., Campuzano S. A., Marchetti D., Santis A. De., 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. Paper no. e2020JA028368. DOI: 10.1029/2020JA028368

76. 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. P. 1—10.
77. Uryadov V. P., Vybornov F. I., Pershin A. V. Features of the HF Signal Propagation on Oblique Sounding Paths During Solar and Magnetic Activity in September 2017. *Radiophys. Quantum Electr.* 2019. 62, № 2. P. 85—98.
DOI: 10.1007/s11141-019-09956-z
78. Venkatesh K., Tulasi Ram S., Fagundes P. R., Seemala G. K., Batista I. S. 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. P. 4553—4570. DOI: 10.1002/2017JA024009
79. Verkhoglyadova O. P., Komjathy A., Mannucci A. J., Mlynczak M. G., Hunt L. A., Paxton L. J. Revisiting ionosphere-thermosphere responses to solar wind driving in superstorms of November 2003 and 2004. *J. Geophys. Res.* 2017. 122, № 10. P. 10,824—10,850. DOI: 10.1002/2017JA024542
80. 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, Is. A11. id:A11328. DOI: 10.1029/2011JA017042
81. 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. Paper № e2020JA028829.
DOI: 10.1029/2020JA028829
82. Wen D., Mei D. Ionospheric TEC disturbances over China during the strong geomagnetic storm in September 2017. *Adv. Space Res.* 2020. 65, Is. 11. P. 2529—2539.
DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.002
83. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844—1993). *Ann. Geophys.* 1997. 15, is. 6. P. 719—728.
DOI: 10.1007/s00585-997-0719-5
84. 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
85. 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, Is. 8. Paper № e2020JA027981.
DOI: 10.1029/2020JA027981
86. Zakharenko 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. P. 10728—10748.
DOI: 10.1029/2019JA026782
87. Zhang S.-R., Erickson P. J., Zhang Y., Wang W., Huang C., Coster A. J., Holt J. M., Foster J. F., 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. P. 1314—1337. DOI: 10.1002/2016JA023307
88. 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. P. 2484—2504. DOI: 10.1002/2016JA023180

REFERENCES

1. Grigorenko Ye. I., Emelyanov L. Ya., Pazura S. A., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric processes during the 7—10 November 2004 extreme geospace storm. 1. Observation

- results. *Space Science and Technology*. 13(4). 62—76 [in Russian].
2. Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric processes during the 7—10 November 2004 extreme geospace storm. 2. Simulation results and discussion. *Space Science and Technology*. 13(4). 77—90 [in Russian].
 3. Grigorenko Y. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Chernogor L. F. (2003). Radio studies of processes in the ionosphere associated with the strongest September 25, 1998 geomagnetic storm. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 9. 57—94 [in Russian].
 4. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. (2005). F. Specific features of the ionospheric storm of March 20—23, 2003. *Geomagnetism and Aeronomy*. 45(6). 745—757.
 5. Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 1. *Space Science and Technology*. 13(5). 58—76 [in Russian].
 6. Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 2. *Space Science and Technology*. 13(5). 77—96 [in Russian].
 7. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007). Ionospheric disturbances during the severe magnetic storm of November 7—10, 2004. *Geomagnetism and Aeronomy*. 47(6). 720—738.
 8. Grigorenko E. I., Pazura S. A., Taran V. I., Chernyaev S. V., Chernogor L. F. (2005). Dynamic processes in the ionosphere during the severe magnetic storm of May 30—31, 2003. *Geomagnetism and Aeronomy*. 45(6). 758—777.
 9. Danilov A. D. (2013). F2-region response to geomagnetic disturbances (review). *Geliogeofiz. Issled.* (5). 1—33 [in Russian].
 10. Danilov A. D., Morozova L. D. (1985). Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). *Geomagnetism and Aeronomy*. 25(5). 705—721 [in Russian].
 11. Emelyanov L. Ya., Katsko S. V., Chernogor L. F. (2019). Ionospheric effects of geospace storms on December 21—24, 2016 and March 21—23, 2017. *Bulletin of the National Technical University "KhPI", Series: Radiophysics and ionosphere*. (№ 25 (1350)). 78—85.
 12. Panasenko S. V., Chernogor L. F. (2007). Event of the November 7—10, 2004, magnetic storm in the lower ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 47(5). 608—620.
 13. Ptitsyna N. G., Danilova O. A., Tyasto M. I., Sdobnov V. E. (2021). Dynamics of cosmic-ray cutoff rigidity and magnetospheric parameters during different phases of the storm of November 20, 2003. *Geomagnetism and Aeronomy*. 61(2). 169—179.
 14. 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.
 15. Chernogor L. F., Dominin I. F. (2014). *Physics of geospace storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
 16. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. (2021). Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 61(1). 73—91.
 17. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2020). Latitudinal dependence of quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the greatest geospace storm of September 7—9, 2017. *Space Science and Technology*. 26(2). 72—83.
 18. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Tyrnov O. F. (2013). The V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory — the tool for ionosphere

- monitoring in space experiments. *Space Project «Ionosat-Micro»* (Eds. S. A. Zasukha, O. P. Fedorov). Kyiv: Akademperiodika Publ., 160—182 [in Russian].
19. Chernogor L. F. (2021). Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*. 27(1(128)). 3—77. DOI: 10.15407/knit2021.01.003
20. Chernogor L. F. (2021). Statistical characteristics of geomagnetic storms in the 24th cycle of solar activity. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 37(4). 49—59. DOI: 10.15407/kfnt2021.04.049
21. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Luo Y. (2020). 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”*. 33. 69—77. DOI: 10.26565/2311-0872-2020-33-06
22. Yasyukevich Yu. V., Perevalova N. P., Edemskiy I. K., Poliakova A. S. (2013). *The response of the ionosphere to solar and geophysical disturbing factors according to GPS, monograph*. Irkutsk: ISU Publishing House, 259.
23. Blagoveshchensky D. V. (2020). Effects of geomagnetic storms in the low-latitude ionosphere. *Cosmic Res.* 58(4). 234—241. DOI: 10.1134/s0010952520040024
24. Blagoveshchensky D. V., Sergeeva M. A. (2019). Impact of geomagnetic storm of September 7—8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. *Adv. Space Res.* 63(1). 239—256. DOI: 10.1016/j.asr.2018.07.016
25. Blagoveshchensky D. V., Zhbankov G. A., Maltseva O. A. (2019). 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*. 61(12). 881—892. DOI: 10.1007/s11141-019-09944-3
26. Bolaji O. S., Fashae J. B., Adebiyi S. J., Owolabi C., Adebesein B. O., Kaka R. O., Jewel Ibanga, Abass M., Akinola O. O., Adekoya B. J., Younas W. (2021). 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.* 126(8). Paper no. e2020JA029068 DOI: 10.1029/2020JA029068
27. Bothmer V., Daglis I. (2007). *Space Weather: Physics and Effects*. Springer-Verlag New York. 438. ISBN 3-642-06289-X.
28. Buonsanto M. J. (1999). Ionospheric Storms — A Review. *Space Science Reviews*. 88. 563—601. DOI: 10.1023/A:1005107532631
29. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. (2007). Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 7. GI3001. DOI: 10.1029/2005GI000125
30. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2020). 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.* 66(2). 226—242. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.037
31. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T. Zheng Y. (2021). 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. 151—156. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9576010
32. Chernogor L. F., Zheng Y., Guo Q., Luo Y., Garmash K. P., Rozumenko V. T. (2022). Features of Ionospheric and Magnetic Effects of August 5—6, 2019 Noticeable Geospace Storm Over China and Ukraine. *Problems of Geocosmos — 2020. 2022. Chapter 28*. Springer Nature Switzerland AG. P. 379—396.
33. D'Angelo G., Piersanti M., Alfonsi L., Spogli L., Clausen L. B. N., Coco I., Li G., Baiqi N. (2018). The response of high latitude ionosphere to the 2015 St. Patrick's

- day storm from in situ and ground based observations. *Adv. Space Res.* 62(3). 638—650. DOI: 10.1016/j.asr.2018.05.005
34. Danilov A. D., Lašovička J. (2001). Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Inter. J. Geomagn. Aeron.* 2(3). 209—224.
35. Despirak I. V., Kleimenova N. G., Gromova L. I., Gromov S. V., Malysheva L. M. (2020). Supersubstorms during Storms of September 7—8, 2017. *Geomagn. Aeron.* 60(3). 292—300. DOI: 10.1134/S0016793220030044
36. Dmitriev A. V., Suvorova A. V., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Rakhmatulin R. A., Parkhomov V. A. (2017). 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.* 122(2). 2398—2423.
DOI: 10.1002/2016JA023260
37. Fejer B. G., Navarro L. A., Sazykin S., Newheart A., Milla M. A., Condor P. (2021). Prompt penetration and substorm effects over Jicamarca during the September 2017 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 126(8). e2021JA029651.
DOI: 10.1029/2021JA029651
38. Feng J., Zhou Y., Zhou Y., Gao S., Zhou C., Tang Q., Liu Y. (2021). Ionospheric response to the 17 March and 22 June 2015 geomagnetic storms over Wuhan region using GNSS-based tomographic technique. *Adv. Space Res.* 67(1). 111—121.
DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.008
39. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. (1998). How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? *Magnetic storms. Geophysical monograph series.* 98. American Geophysical Union, Washington, D.C. 203—226. DOI: 10.1029/GM098.
40. Ghodpage R. N., Patil P. T., Gurav O. B., Gurubaran S., Sharma A. K. (2018). 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.* 62(3). 624—637. DOI: 10.1016/j.asr.2018.05.003
41. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasylunas V. M. (1994). What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 99(A4). 5771—5792. DOI: 10.1029/93JA02867
42. Imtiaz N., Younas W., Khan M. (2020). Response of the low-to mid-latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017. *Ann. Geophys.* 38(2). 359—372.
DOI: 10.5194/angeo-38-359-2020
43. Jiang C., Yang G., Liu J., Yokoyama T., Liu T., Lan T., Zhou C., Zhang Y., Zhao Z., Komolmis T., Supnithi P., Yatini C. Y. (2017). Equatorial and low-latitude ionospheric response to the 17–18 March 2015 great storm over South East Asia longitude sector. *J. Geophys. Res.* 122(5). 5756—5767.
DOI: 10.1002/2017JA024134
44. Jimoh O., Lei J., Zhong J., Owolabi C., Luan X., Dou X. (2019). Topside Ionospheric Conditions During the 7—8 September 2017 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res.* 124(11). 9381—9404. DOI: 10.1029/2019JA026590
45. Jin S., Jin R., Kutoglu H. (2017). Positive and Negative Ionospheric Responses to the March 2015 Geomagnetic Storm from BDS Observations. *J. Geodes.* 91(6). 613—626. DOI: 10.1007/s00190-016-0988-4
46. Jonah O. F., Coster A., Zhang S., Goncharenko L., Erickson P. J., de Paula E. R., Kherani E. A. (2018). TID Observations and Source Analysis During the 2017 Memorial Day Weekend Geomagnetic Storm Over North America. *J. Geophys. Res.* 123(10). 8749—8765. DOI: 10.1029/2018JA025367
47. Katsko S. V., Emelyanov L. Y., Chernogor L. F. (2021). 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). 01—04.

DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560587

48. Kumar S., Kumar V. V. (2019). 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.* 124(1). 584—602.
DOI: 10.1029/2018JA025674
49. Kumar V. V., Parkinson M. L. (2017). A Global Scale Picture of Ionospheric Peak Electron Density Changes during Geomagnetic Storms. *Space Weather*. 15(4). 637—652. DOI: 10.1002/2016SW001573
50. Laštovička J. (1996). Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 58(7). 831—843.
DOI: 10.1016/0021-9169(95)00106-9
51. 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. (2018). 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.* 123(4). 3217—3232. DOI: 10.1029/2017JA025166
52. Li S. (2021). Temporal evolution analysis of storm-enhanced density during an intense magnetic storm on March 2015. *Adv. Space Res.* 67(5). 1570—1579.
DOI: 10.1016/j.asr.2020.12.004
53. Lissa D., Srinivasu V.K.D., Prasad D.S.V.V.D., Niranjan K. (2020). 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.* 66(6). P. 1427—1440. DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.025
54. Liu G., Shen H. (2017). 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.* 59(9). 2301—2312.
DOI: 10.1016/j.asr.2017.02.021
55. Liu J., Zhang D.-H., Coster A. J., Zhang S.-R., Ma G.-Y., Hao Y.-Q., Xiao Z. (2019). 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.* 37(4). 673—687. DOI: 10.5194/angeo-37-673-2019
56. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Yu. (2021). Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August 2 September, 2019 geospace storm. *Ann. Geophys.* 39(4).
DOI: 10.5194/angeo-39-657-2021
57. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Garmash K. P., Chernogor L. F., Shulga S. M. (2021). Geospace storm effects on August 5—6, 2019. *Space Science and Technology*. 27(2(129)). 45—69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
58. Mannucci A. J., Tsurutani B. T., Iijima B. A., Komjathy A., Saito A., Gonzalez W. D., Guarnieri F. L., Kozyra J. U., Skoug R. (2005). Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29—30, 2003 “Halloween storms”. *Geophys. Res. Lett.* 32. L12S02.
DOI: 10.1029/2004GL021467
59. Mansilla G. A., Zossi M. M. (2020). Longitudinal variation of the ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm at equatorial/low latitudes. *Pure Appl. Geophys.* 177(12). 5833—5844. DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1
60. Matsushita S. (1959). A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 64(4). 305—321. DOI: 10.1029/JZ064i003p00305
61. Ngwira C. M., Habarulema J.-B., Astafyeva E., Yizengaw E., Jonah O. F., Crowley G., Gisler A., Coffey V. (2019). Dynamic Response of Ionospheric Plasma Density to

- the Geomagnetic Storm of 22—23 June 2015. *J. Geophys. Res.* 124(8). 7123—7139. DOI: 10.1029/2018JA026172
62. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Yu. M., Figurski M. (2017). Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors.* 17(10). 2298. DOI: 10.3390/s17102298
63. Olwendo O. J., Cesaroni C., Yamazaki Y., Cilliers P. (2017). Equatorial ionospheric disturbances over the East African sector during the 2015 St. Patrick's day storm. *Adv. Space Res.* 60(8). 1817—1826. DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.037
64. Paul B., De B. K., Guha A. (2018). Latitudinal variation of F-region ionospheric response during three strongest geomagnetic storms of 2015. *Acta Geodaetica et Geophysica.* 53(4). 579—606. DOI: 10.1007/s40328-018-0221-4
65. Piersanti M., Cesaroni C., Spogli L., Alberti T. (2017). Does TEC react to a sudden impulse as a whole? The 2015 Saint Patrick's day storm event. *Adv. Space Res.* 60(8). 1807—1816. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.021
66. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zhrebtsov 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. DOI: 10.1016/j.asr.2017.09.030
67. Prölss G. W. (1995). Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics.* Edited by H. Volland. CRC Press, Roca Raton, Fla. 2. 195—248.
68. Prölss G. W. (1998). Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere, In ed. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. *Magnetic storms. Geophysical monograph series.* 98. American Geophysical Union, Washington, D.C. 249—290.
69. Prölss G. W., Jung M. J. (1978). Travelling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 40(12). 1351—1354. DOI: 10.1016/0021-9169(78)90088-0
70. Ray S., Roy B., Paul K. S., Goswami S., Oikonomou C., Haralambous H., Chandel B., Paul A. (2017). Study of the effect of 17—18 March 2015 geomagnetic storm on the Indian longitudes using GPS and C/NOFS. *J. Geophys. Res.* 122(2). 2551—2563. DOI: 10.1002/2016JA023127
71. Rubtsov A. V., Maletckii B. M., Danilchuk E. I., Smotrova E. E., Shelkov A. D., Yasyukevich A. S. (2020). Ionospheric disturbances over eastern Siberia during April 12-15, 2016 geomagnetic storms. *Sol.-Terr. Phys.* 6(1). 60—68. DOI: 10.12737/STP-61202007
72. Şentürk E. (2020). Investigation of global ionospheric response of the severe geomagnetic storm on June 22—23, 2015 by GNSS-based TEC observations. *Astrophys. Space Sci.* 365(7). 110. DOI: 10.1007/s10509-020-03828-z
73. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Y., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenko 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
74. Shreedevi P. R., Choudhary R. K., Thampi Smitha V., Yadav Sneha, Pant T. K., Yu Yiqun, McGranaghan Ryan, Thomas Evan G., Bhardwaj Anil, Sinha A. K. (2020). 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.* 18(8). e2019SW002383. DOI: 10.1029/2019SW002383

75. Spogli L., Sabbagh D., Regi M., Cesaroni C., Perrone L., Alfonsi L., Mauro D. Di, Lepidi S., Campuzano S. A., Marchetti D., Santis A. De., Malagnini A., Scotto C., Cianchini G., Shen X., Piscini A., Ippolito A. (2021). 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.* 126(2). e2020JA028368. DOI: 10.1029/2020JA028368
76. Sun W.-J., Ning B.-Q., Zhao B.-Q., Li G.-Z., Hu L.-H., Chang S.-M. (2017). Analysis of ionospheric features in middle and low latitude region of China during the geomagnetic storm in March 2015. *Acta Geophysica Sinica*. 60(1). 1—10.
77. Uryadov V. P., Vybornov F. I., Pershin A. V. (2019). Features of the HF signal propagation on oblique sounding paths during solar and magnetic activity in September 2017. *Radiophys. Quantum Electr.* 62(2). 85—98.
DOI: 10.1007/s11141-019-09956-z
78. Venkatesh K., Tulasi Ram S., Fagundes P. R., Seemala G. K., Batista I. S. (2017). Electrodynamic disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015. *J. Geophys. Res.* 122(4). 4553—4570.
DOI: 10.1002/2017JA024009
79. Verkhoglyadova O. P., Komjathy A., Mannucci A. J., Mlynczak M. G., Hunt L. A., Paxton L. J. (2017). Revisiting ionosphere-thermosphere responses to solar wind driving in superstorms of November 2003 and 2004. *J. Geophys. Res.* 122(10). 10,824—10,850.
DOI: 10.1002/2017JA024542
80. 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(A11). A11328. DOI: 10.1029/2011JA017042
81. Wang Z., Zou S., Liu L., Ren J., Aa E. (2021). Hemispheric asymmetries in the mid-latitude ionosphere during the September 7—8, 2017 storm: multi-instrument observations. *J. Geophys. Res.* 126(4). e2020JA028829.
DOI: 10.1029/2020JA028829
82. Wen D., Mei D. (2020). Ionospheric TEC disturbances over China during the strong geomagnetic storm in September 2017. *Adv. Space Res.* 65(11). 2529—2539.
DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.002
83. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. (1997). Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 — 1993). *Ann. Geophys.* 15(6). 719—728.
DOI: 10.1007/s00585-997-0719-5
84. Xu Z., Hartinger M., Clauer C., Peek T., Behlke R. (2017). A comparison of the ground magnetic responses during the 2013 and 2015 St Patrick's Day geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 122(4). 4023—4036. DOI: 10.1002/2016JA023338
85. Younas W., Amory-Mazaudier C., Khan M., Fleury R. (2020). Ionospheric and Magnetic Signatures of a Space Weather Event on 25—29 August 2018: CME and HSSWs. *J. Geophys. Res.* 125(8). e2020JA027981. DOI: 10.1029/2020JA027981
86. Zakharenkova I., Cherniak I., Krankowski A. (2019). Features of storm-induced ionospheric irregularities from ground-based and spaceborne GPS observations during the 2015 St. Patrick's day storm. *J. Geophys. Res.* 124(12). 10728—10748.
DOI: 10.1029/2019JA026782
87. Zhang S.-R., Erickson P. J., Zhang Y., Wang W., Huang C., Coster A. J., Holt J. M., Foster J. F., Sulzer M., Kerr R. (2017). Observations of ion-neutral coupling associated with strong electrodynamic disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. Geophys. Res.* 122(1). 1314—1337. DOI: 10.1002/2016JA023307
88. Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Rogov D., Romanova E., Chelpanov M. (2017). Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17—19 March 2015. *J. Geophys. Res.* 122(2). 2484—2504. DOI: 10.1002/2016JA023180

Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

MAGNETO-IONOSPHERIC EFFECTS FROM GEOSPACE STORM
OF MARCH 21—23, 2017

The region of space where geospace storms evolve is the Sun — interplanetary-medium — magnetosphere — ionosphere — atmosphere — Earth (internal spheres) (SIMMIAE) system. The study of physical effects of geospace storms is one of the most important scientific questions in space geophysics. The problem of interactions between the SIMMIAE components evolving in the course of geospace storms is an interdisciplinary problem, which requires employing the systems approach for its solution. The problem involves many factors, and the response of the components is determined by simultaneous (synergistic) impact of a few perturbation factors. It is important that the SIMMIAE system is an open, nonlinear, and nonstationary system where positive and negative direct and reverse coupling mechanisms are present. Because of the multi-faceted manifestations of geospace storms and the unique nature of each storm, the study of physical effects of geospace storms is a pressing science problem. In addition to a comprehensive study of physical effects of geospace storms, the detailed adequate modeling and forecasting play a crucial role in maintaining a habitable and sustainable environment for a technology-reliant society. The greater the technological advances, the more vulnerable the civilization infrastructure is to the effects of solar and geospace storms. The objective of this work is to present the results of analysis of magneto-ionospheric effects that accompanied the geospace storm of March 21—23, 2017. To observe the effects caused by the geospace storm of March 21—23, 2017 in the ionosphere and in the magnetic field, the following instruments were taking measurements. The digisonde and the Doppler radar for vertical incidence measurements, located at the V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory (49°38' N, 36°20' E), as well as the fluxmeter magnetometer at the V. N. Karazin Kharkiv National University Magnetometer Observatory (49°38' N, 36°56' E). The Doppler radar taking measurements at vertical incidence usually operates at two fixed frequencies, 3.2 MHz and 4.2 MHz. The smaller frequency is an efficient means for studying dynamical processes in the E and F1 regions, and the second one in the F1 and F2 regions. The fluxmeter magnetometer monitors the variations in the H and D components. The analysis of the ionospheric processes has been based on the ionograms. The frequency dependences of the virtual heights, z , are first used to calculate the altitude, z , dependences of the electron density, N . Then, the universal time dependences $N(t)$ are plotted for fixed altitudes in the 140...260-km altitude range. Next, the systems spectral analysis is employed to estimate the periods, T , and the absolute amplitudes, N_a , of the quasiperiodic variations in $N(t)$, as well as their relative variations, $\frac{N_a}{N}$. The amplitudes of Doppler radar vertically reflected signals have also been employed in the analysis. Time gating of the reflected signals has made it possible to obtain the temporal dependences of the amplitude of the beat signal between the reference signal and the reflected signal, as well as the Doppler shift for certain altitude ranges. The data have made it possible to track the local time dynamics of the radio wave amplitudes and reflection heights in the course of the ionospheric storms. A detailed analysis of the Doppler spectra has also been undertaken. The UT dependences of the Doppler spectra in the (2...+2)-Hz frequency range have been plotted applying the Fourier transform performed over 60-s intervals to the amplitudes of the beat signals. Then, the temporal dependences of the Doppler shift, $f_d(t)$, is formed for the main ray. Next, the $f_d(t)$ dependences undergo the systems spectral analysis over 120-min intervals. The output of the fluxmeter magnetometer acquired on a relative scale is converted into nanoteslas employing the magnetometer frequency response. Next, the temporal dependences of the H and D components are formed. Further, these dependences undergo the systems spectral analysis over 24-h intervals in the 1...1,000-s period, T , range. The main results of the study are as follows. The geospace storm, which power attained 18 GJ/s, was observed to occur on March 21—23, 2017. The storm is classified as weak, based on

its intensity. The geospace storm was accompanied by a weak ionospheric perturbation in the daytime and by a strong ionospheric storm at night, while the electron density showed a factor of 1.3 and 4...5 times decrease, respectively. The geospace storm was also accompanied by two moderate magnetic storms, the energy of which were estimated to be 10^{15} J and power of 70 GW. During the magnetic storms, the level of fluctuations in the horizontal components enhanced in the 100...1,000-s period range from ± 0.5 nT to ± 5 nT, and the fluctuation spectra significantly changed.

Keywords: ionosphere, geospace storm, magnetic storm, ionospheric effect, Doppler shift of frequency, radio wave reflection level, quasi-periodic perturbation, perturbation parameters.

Стаття надійшла до редакції 19.01.2022

Після доопрацювання 19.01.2022

Прийнята до друку 22.04.2022