

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.04.232>
УДК 551.558+551.596+534.221

Л.Ф. Чорногор

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ЗБУРЕННЯ В ІОНОСФЕРІ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ СТАРТИ ТА ПОЛЬОТИ ПОТУЖНИХ РАКЕТ

Предмет і мета роботи. Іоносфера є основним каналом поширення радіохвиль. Її стан визначається станом атмосферно-космічної погоди, що залежить від процесів на Сонці, у геокосмосі та в атмосфері Землі. Внесок у стан атмосферно-космічної погоди роблять і старти та польоти потужних ракет. Метою цієї роботи є представлення результатів спостережень та аналізу збурень в іоносфері, які супроводжували старти та польоти важких ракет з різних космодромів світу.

Методи та методологія. Для діагностики збурень в іоносфері використовувався доплерівський радар вертикального зондування, здатний виявляти відносні збурення концентрації електронів $10^{-3} \dots 10^{-2} \%$ за періоди коливань $10^2 \dots 10^3$ с. Сигнал биттів відбитого від іоносфери та опорного сигналів піддавався спектральній обробці на часовому інтервалі в 1 хв.

Результати. За даними спостережень, старт ракети з космодрому Плесецьк (РФ) супроводжувався аперіодичним збуренням зі швидкістю $1000 \dots 1140$ м/с упродовж ~ 20 хв. Збурення зі швидкістю $450 \dots 500$ м/с також було аперіодичним. Квазіперіодичне збурення з періодом $6 \dots 7$ хв і швидкістю $330 \dots 340$ м/с переносилося довгохвильовим інфра звуком. Амплітуда відносного збурення концентрації електронів була близькою до $\delta_N \approx 1 \%$. Для атмосферних гравітаційних хвиль з періодом $20 \dots 30$ хв δ_N оцінюється як $6 \dots 14 \%$. Після старту ракети «Протон М» спостерігалися три групи збурень зі швидкостями $555, 240$ і 170 м/с; при цьому $\delta_N \approx 1.5 \dots 3 \%$. При старті ракети з космодрому Веньчан (КНР) відзначено три можливі групи збурень зі швидкостями $560, 410$ і 270 м/с. Для квазіперіодичного збурення значення $\delta_N \approx 1.5 \%$. Збурення, що були зареєстрованими після старту ракети Falcon 9, швидше за все, не пов'язані з польотом ракети. Аперіодичні збурення, що послідували за стартом ракети Ariane 5, могли бути пов'язаними з польотом ракети.

Висновки. Виявлені збурення, які супроводжували старти та польоти важких ракет для космодромів, розташованих на відстані $\sim 1.5 \dots 2.5$ тис. км від місця реєстрації.

Ключові слова: політ ракети, великомасштабне збурення, іоносфера, аперіодичне та квазіперіодичне збурення, концентрація електронів.

Вступ

Дослідження реакції іоносфери на старт і політ потужних ракет ведуться давно (див., напри-

клад, [1–11]). Як правило, вимірювання здійснюються поблизу місця старту ракети або вздовж траєкторії її польоту, де збурення максимальні. Виявлено і детально досліджено іоносферні

Цитування: Чорногор Л.Ф. Великомасштабні збурення в іоносфері, що супроводжували старти та польоти потужних ракет. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 4. С. 232–249. <https://doi.org/10.15407/rpra30.04.232>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

«діри» [1–12], а також можливості генерації рухомих іоносферних збурень. Виявилось, що такі збурення переносяться на відстані у тисячі кілометрів [13–16]. Вони мають достатню енергетику, щоб забезпечити взаємодію підсистем у системі «Земля—атмосфера—іоносфера—магнітосфера» та вплинути на стан атмосферно-космічної погоди.

Джерелом збурень служить як надзвуковий струмінь ракетних двигунів, що має швидкість 3...4 км/с, так і рух ракети — спочатку з дозвуковою, а потім і надзвуковою швидкістю.

Оцінимо енергетику ракетного струменя. Для важких ракет маса палива першого ступеня m_1 становить 100...500 т, а час роботи $\tau_1 \approx 100...300$ с. При цьому витрати маси палива $\mu_1 \approx 0.3...4.0$ т/с. Енергію та потужність ракетного струменя можна подати такими співвідношеннями:

$$E = qm, P = q\mu, \mu = dm/dt,$$

де q — питомий енерговміст, що залежить від виду палива та змінюється в межах $10...10^2$ МДж/кг. Для першого ступеня $E_1 \approx 1...5$ ТДж, $P_1 \approx 3...40$ ГВт. Для другого ступеня $m_2 \approx 20...160$ т, $\tau_2 \approx 200...300$ с, $\mu_2 \approx 0.1...0.8$ т/с і $E_2 \approx 0.2...1.6$ ТДж, $P_2 \approx 1...8$ ГВт.

Ракетний струмінь є джерелом вторинних збурень. Його діаметр (а також довжина) залежить від висоти:

$$d_{jet} = 2\sqrt{\frac{F}{p_0}},$$

де F — тяга двигуна ракети; p_0 — атмосферний тиск. На висоті $z \approx 100...150$ км маємо $p_0 \approx 10^{-1}...10^{-3}$ Па. Тоді при тязі другого ступеня $F \approx 0.25...2.5$ МН отримуємо $d_{jet} \approx 3.2...32$ км на висоті $z \approx 100$ км. На висоті 150 км значення d_{jet} у 10 разів більше.

В енергію хвильових збурень переходить щонайменше 1 % енергії ракетного струменя, тобто близько 10...50 ГДж для першого ступеня та ~2...16 ГДж для другого ступеня.

Надзвуковий політ ракети супроводжується генерацією потужної ударної хвилі, що концентрується в конусі з таким кутовим розміром [14]:

$$\theta = \arctg \frac{v_s}{v_r},$$

де v_s — швидкість звуку; v_r — швидкість ракети. На висотах іоносфери $v_s/v_r \ll 1$ і $\theta \approx v_s/v_r$. Наприклад, при $v_s \approx 0.3...0.5$ км/с і $v_r \approx 3...5$ км/с

маємо $\theta \approx 0.1$ рад $\approx 6^\circ$. Час існування ударної хвилі становить ~10 хв.

Дослідженню великомасштабних збурень в іоносфері присвячено велику кількість робіт (див., наприклад, [12–32]). Результати багаторічних досліджень сумовано в монографіях [33, 34]. У нових дослідженнях [35–45] для діагностики збурень застосовувалися GPS-технології. У цих роботах показано, що збурення повного електронного вмісту концентрично поширюються від джерела, оцінено величину ефекту (~0.1...0.4 TECU) та швидкості поширення збурень (від ~1.6 км/с до кількох сотень метрів за секунду).

З часу публікації робіт автора [13–28, 33, 34] відбулися наступні зміни. Більше не використовуються надважкі ракети системи *Space Shuttle* та «Енергія»/«Буран». Натомість з'явилися нові важкі ракети *Falcon*, *Long March*, *Ariane* та ін. Введені до ладу нові космодроми (наприклад, космодром Веньчан, КНР).

Слід мати на увазі, що кількість запусків великих ракет у 1970–2020 рр. становила приблизно 60...100. З наслідками цих запусків не можна не рахуватися. Все це означає, що вивчення реакції іоносфери на старту та польоти ракет, які помітно відрізняються за своїми параметрами, видом палива, місцем старту та траєкторіями, є актуальною задачею космічної радіофізики та радіофізики геокосмосу.

Метою цієї роботи є виклад результатів спостереження й аналізу збурень в іоносфері, які супроводжували старту та польоти важких ракет з різних космодромів світу.

1. Стан космічної погоди

Для виділення можливих іоносферних ефектів стартів ракет важливо, щоб стан іоносфери не був збурений іншими високоенергетичними джерелами і, насамперед, Сонцем.

Для аналізу стану космічної погоди залучалися відомості про числа Вольфа W , індекси $F10.7$, K_p та A_p , які представлені на сайті <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html>. Значення цих чисел та індексів наведено у табл. 1. Дані цієї таблиці свідчать, що збурення іоносфери Сонцем були відсутні. Стан іоносфери був сприятливим для виділення збурень в іоносфері, які могли бути пов'язані зі стартами ракет.

2. Засоби та методи досліджень

Радар вертикального доплерівського зондування використовувався для реєстрації іоносферних збурень, викликаних стартами та польотами ракет. Він розташований поблизу м. Харків (Україна) на території Радіофізичної обсерваторії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, її координати: $49^{\circ}38'$ пн. ш., $36^{\circ}20'$ сх. д. [64]. Основні параметри радара: діапазон частот $f = 1 \dots 24$ МГц, імпульсна потужність радіопередавального пристрою — 1 кВт, тривалість зондувального імпульсу — 500 мкс, частота повторення імпульсів — 100 Гц, смуга пропускання фільтра радіоприймального пристрою — 10 Гц. Антенна система являє собою вертикальний ромб з коефіцієнтом підсилення $G \approx 1 \dots 10$ залежно від частоти зондувальної радіохвилі. При такому потенціалі радара відношення сигнал/завада для звичайної хвилі в нічний час може досягати $10^5 \dots 10^6$. У денний час відношення сигнал/завада зазвичай на 1–2 порядки менше. Роздільна здатність доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) f_d близько 17 МГц. Радар спряжений із персональним комп'ютером, утворюючи програмно-апаратний комплекс, що здійснює вимірювання та попередню обробку відбитого від іоносфери сигналу в реальному часі.

Висотна протяжність відбитого зондувального сигналу близька до 150 км. З огляду на це використовувалося стробування по висоті з дискретизацією $\Delta z' = 75$ км у діапазоні діючих висот $z' = 75 \dots 450$ км, якому відповідає діапазон дійсних висот $75 \dots 300$ км, а дискретизація відліків висоти $\Delta z \approx 30 \dots 35$ км. При цьому виділяється основний канал, в якому амплітуда сигналу має максимальні значення.

Таблиця 1. Стан космічної погоди

Дата	W	F10.7	K_p		A_p
			max	min	
15 лютого 2021	0	68.0	2.7	0	4
11 березня 2021	22	74.6	2.7	0	3
29 квітня 2021	37	78.0	1.3	0.3	4
21 липня 2021	72	96.5	2.3	0	5
9 вересня 2021	102	101.1	1.7	0.7	4
10 вересня 2021	97	97.6	3.3	0.7	8

Сигнал биттів відбитого від іоносфери та опорного сигналів піддавався спектральній обробці на інтервалі часу 1 хв, і будувалися часові залежності доплерівських спектрів (ДС). Для загального контролю за станом іоносфери використовувався розташований поруч з доплерівським радаром цифровий іонозонд.

3. Результати аналізу даних спостережень

Попередні дослідження показали, що при стартах та польотах ракет змінюються всі основні характеристики радіохвиль (амплітуда, фаза, ДЗЧ, поляризація) [13–18]. Найбільш чутливими виявляються варіації ДЗЧ.

Наведемо приклади часових варіацій ДЗЧ на вертикальних радіотрасах для частот 3.2 та 4.2 МГц. Зауважимо, що нічні вимірювання в період, близький до мінімуму сонячної активності, до якого належав і 2021 р., часто були неефективними через відсутність відбитого сигналу на вказаних частотах.

Основні відомості про космодроми та ракети, що з них стартували, наведені в табл. 2. За даними цієї таблиці, відстань R між пунктом спостереження і космодромом змінювалася від ~ 1500 до 9500 км. Відповідно до класифікації автора [49], використовувалися ракети важкого класу з масою від 300 до 1000 т. Тяга першого ступеня змінювалася від ~ 1 до ~ 10 МН, тяга другого ступеня — від ~ 27 до 2400 кН. Час роботи першого ступеня варіював від 118 до 605 с, а другого ступеня — від 211 до 1100 с.

Реакція іоносфери на старт і політ ракети могла бути пов'язана з будь-якими змінами характеру сигналу і, зокрема, ДЗЧ. Цим ми і керувалися при пошуку можливої реакції та визначенні її часу запізнювання Δt .

Космодром Плесецьк. Ракета «Союз-2.16» стартувала 9 вересня 2021 р. о 22:59:47 LT (тут і надалі вважаємо, що місцевий для Радіофізичної обсерваторії час несуттєво відрізняється від київського часу). Часові варіації ДЗЧ для частот 3.2 та 4.2 МГц показані на рис. 1 і 2. З рис. 1 видно, що зміни характеру сигналу спостерігалися близько 23:30, 24:00 9 вересня 2021 р. та о 02:20 10 вересня 2021 р. Після 00:53 10 вересня 2021 р. виникли квазіперіодичні коливання з ампліту-

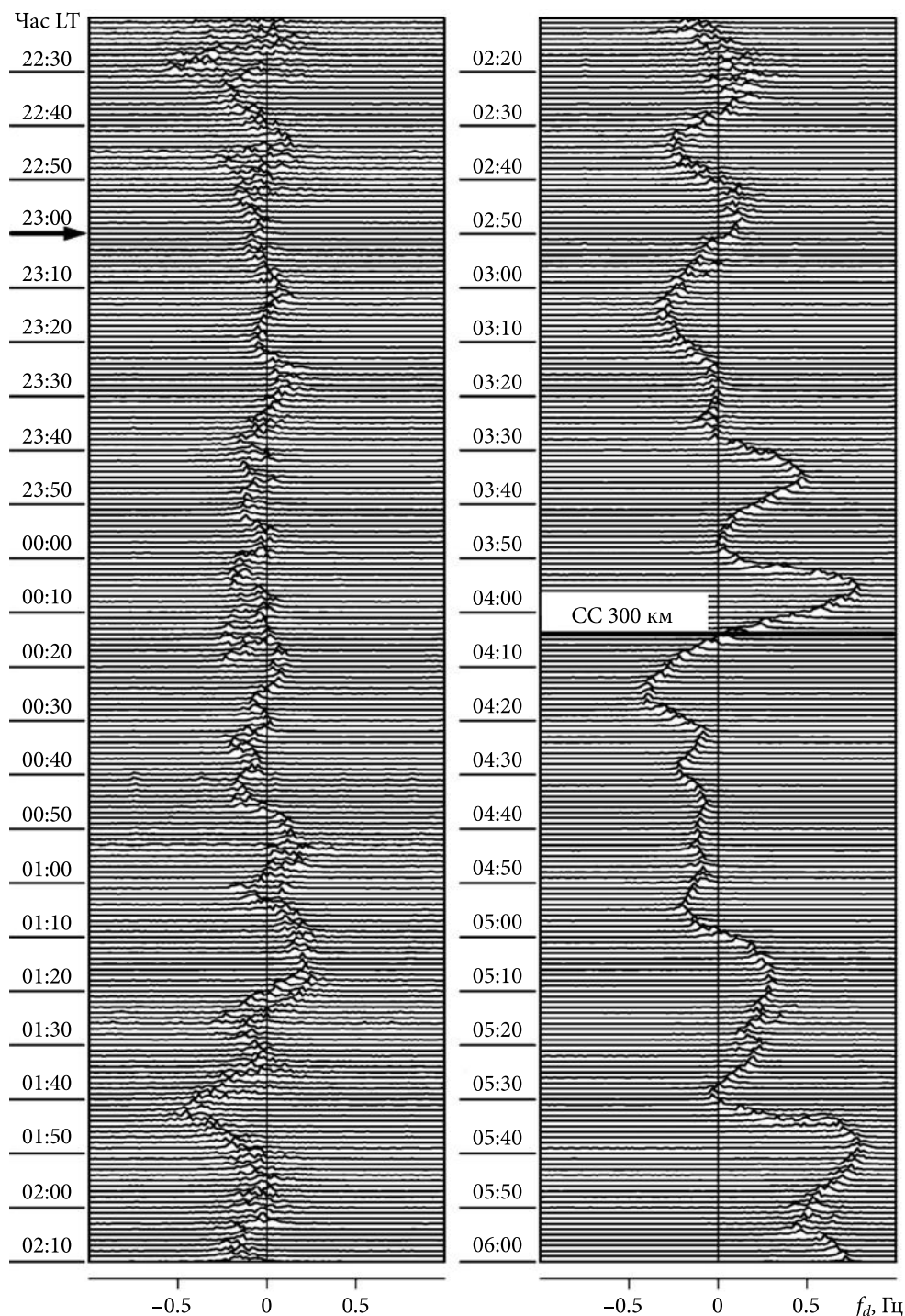


Рис. 1. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети «Союз-2.16» 9 вересня 2021 р. о 22:59:47 з космодрому Плесецьк: частота 3.2 МГц; діапазон діючих висот 300...375 км; діапазон дійсних висот 225...275 км. Тут і надалі стрілка вказує на моменти старту ракети, а горизонтальні лінії — на моменти сходу Сонця (СС) або заходу Сонця (ЗС) на відповідній висоті

дою $f_{da} \approx 0.3$ Гц і періодом $T \approx 20$ хв. Коливання тривали всю ніч. З 03:50 до 04:25 10 вересня 2021 р. амплітуда досягала 0.6 Гц, а $T \approx 30$ хв.

З рис. 2 можна бачити, що характер сигналу змінювався близько 23:27 та 23:55 9 вересня 2021 р., а також близько 00:18 та 00:50 10 верес-

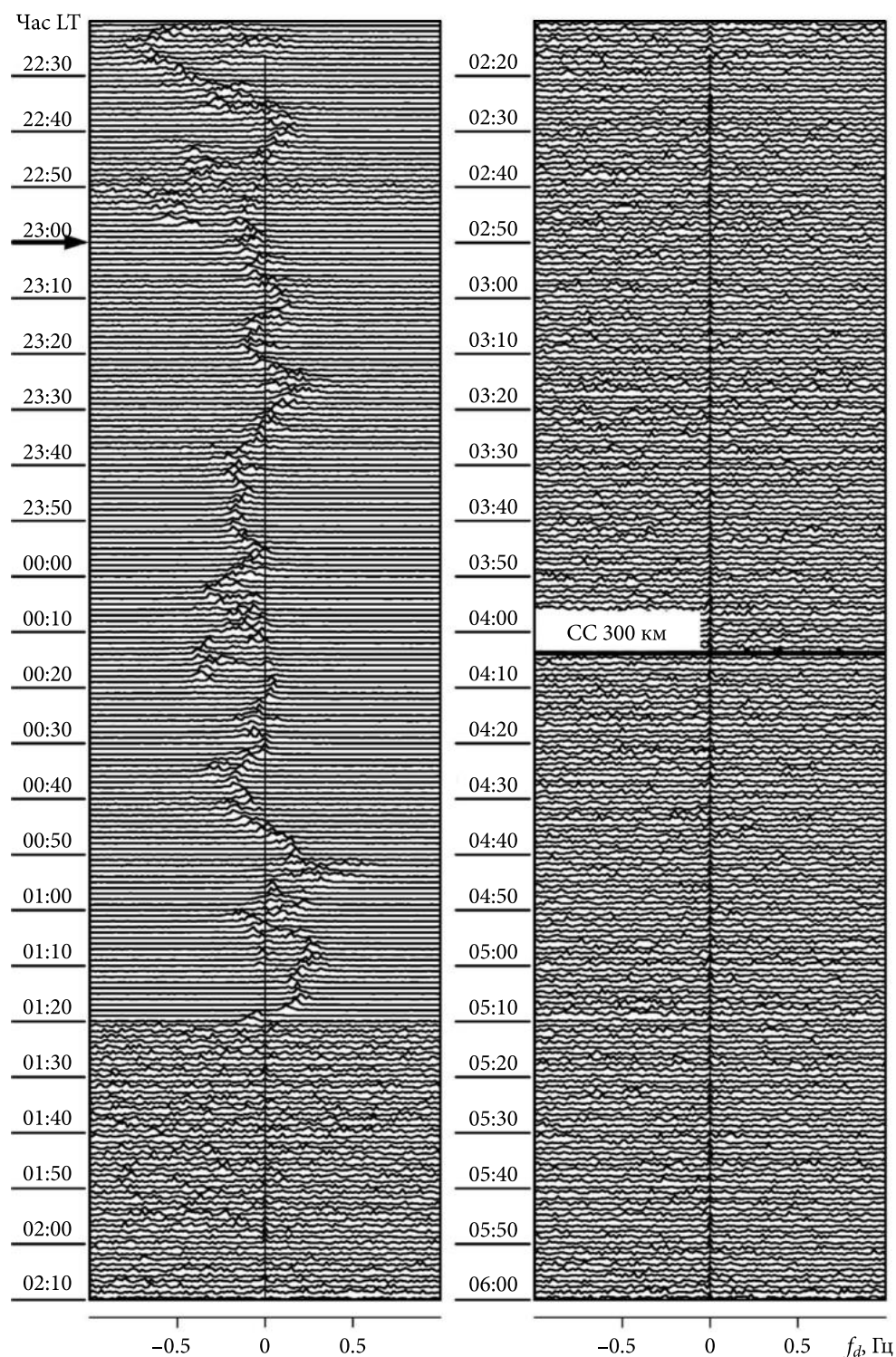


Рис. 2. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети «Союз-2.1б» 9 вересня 2021 р. о 22:59:47 з космодрому Плесецьк: частота 4.2 МГц; діапазон діючих висот 375...450 км; діапазон дійсних висот 275...325 км

ня 2021 р. Після 01:20 сигнал на частоті 4.2 МГц перестав відбиватися від іоносфери. Це тривало принаймні до кінця вимірювань (06:00).

Космодром Байконур. Ранковий старт ракети «Союз-2.1а» відбувся 15 лютого 2021 р. о 06:45:06. Зміни характеру сигналу відзначалися близько

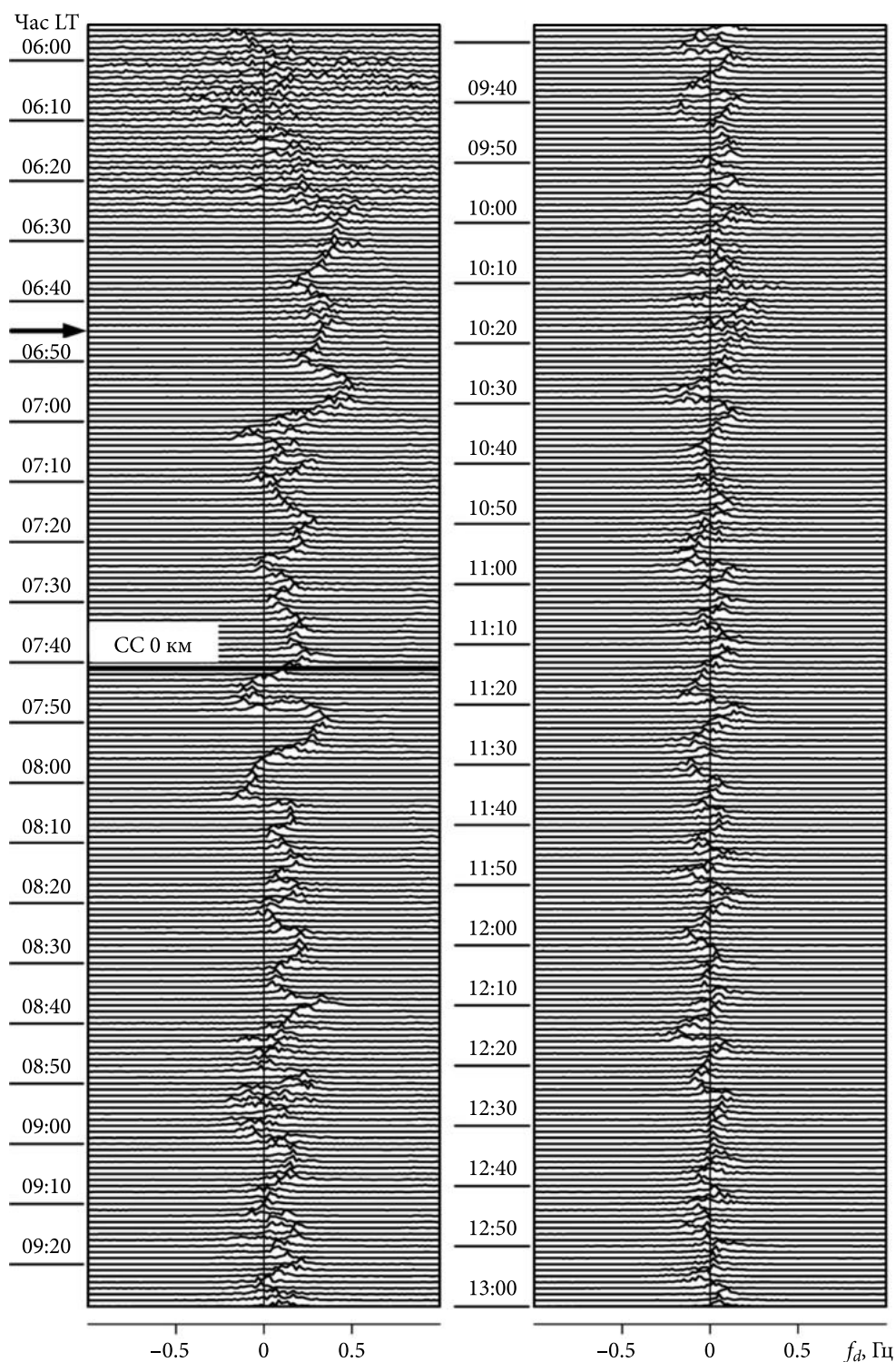


Рис. 3. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети «Союз-2.1а» 15 лютого 2021 р. о 06:45:06 з космодрому Байконур: частота 3.2 МГц; діапазон діючих висот 225...300 км; діапазон дійсних висот 175...225 км

08:00 та 08:40 (рис. 3). В інтервалі часу 08:00—08:40 змінився період квазіперіодичних коливань: він зменшився від ~15 до 5...6 хв. При цьо-

му $f_{da} \approx 0.10...0.15$ Гц. Потім період поступово збільшувався до 10 хв. З 08:40 і до 10:30 спостерігалось уширення і навіть «розвал» ДС.

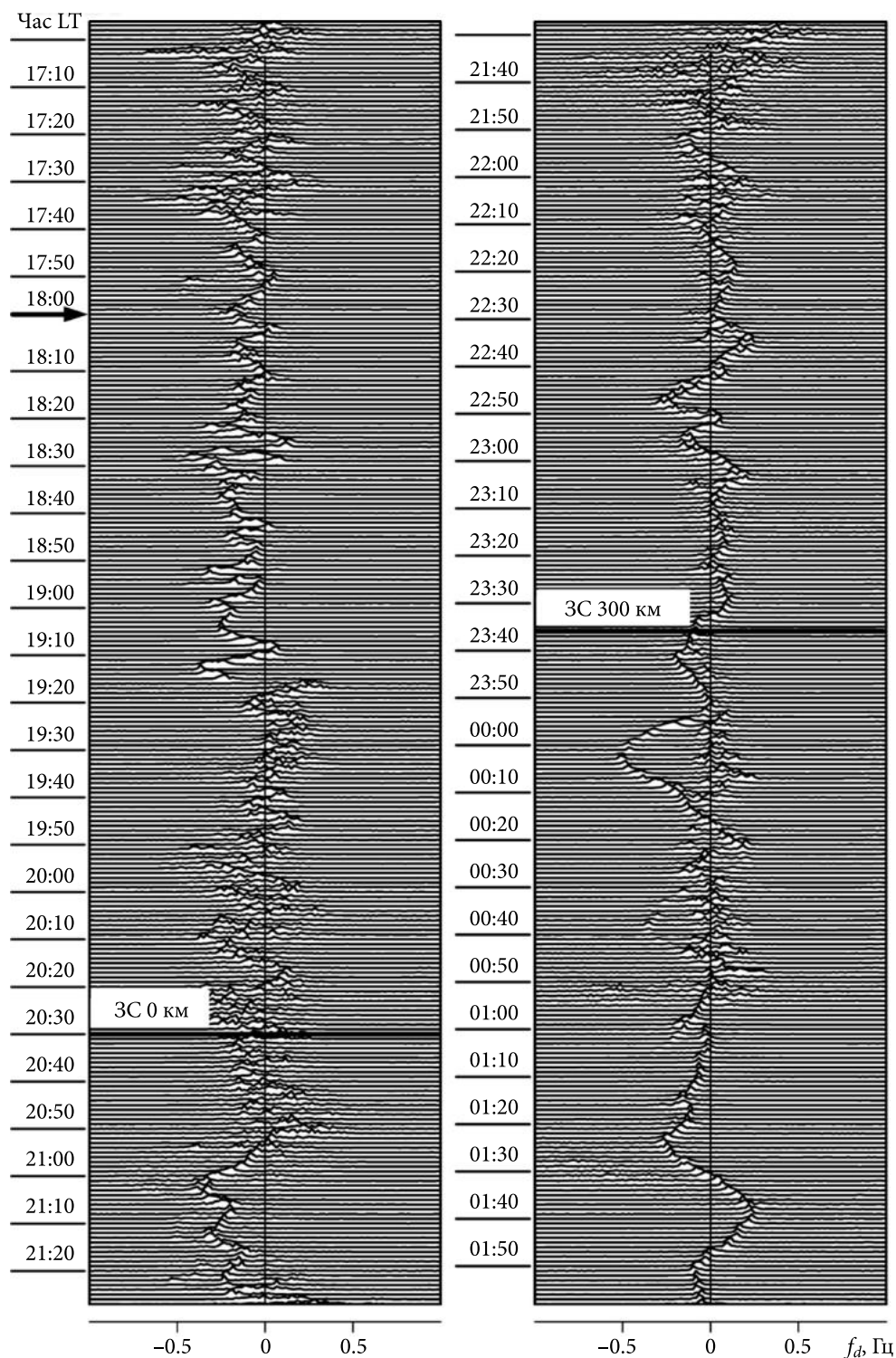


Рис. 4. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети «Протон М» 21 липня 2021 р. о 17:58 з космодрому Байконур: частота 3.2 МГц; діапазон діючих висот 225...300 км; діапазон дійсних висот 150...185 км

Денний старт ракети «Протон М» мав місце 21 липня 2021 р. о 17:58. О 19:15 стався «розвал» ДС, який тривав до 20:52 (рис. 4). Після 20:52 в

іоносфері епізодично спостерігалися квазіперіодичні коливання, амплітуда яких досягала 0.2...0.3 Гц, а $T \approx 20$ хв.

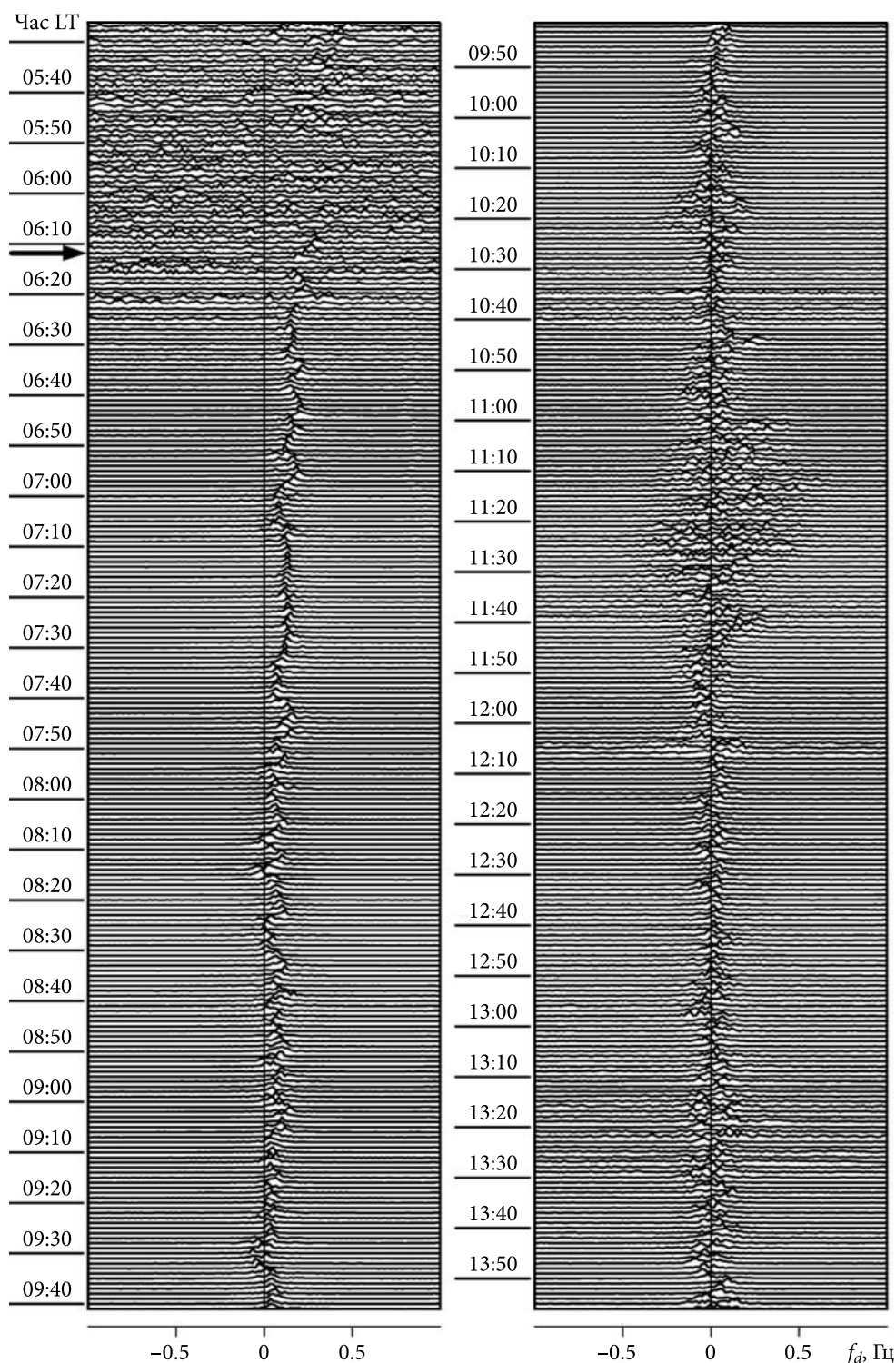


Рис. 5. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети *Long March 5B* 29 квітня 2021 р. о 06:12 з космодрому Веньчан: частота 3.2 МГц; діапазон діючих висот 225...300 км; діапазон дійсних висот 150...185 км

Космодром Веньчан. Важка китайська ракета *Long March 5B* стартувала 29 квітня 2021 р. о 06:12 (у Китаї — денний час). До 06:22 відбитий

сигнал на частоті 3.2 МГц був відсутній. З 06:22 до 09:50 мали місце слабкі квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $f_{da} \approx 0.05$ Гц і $T \approx 5...7$ хв (рис. 5).

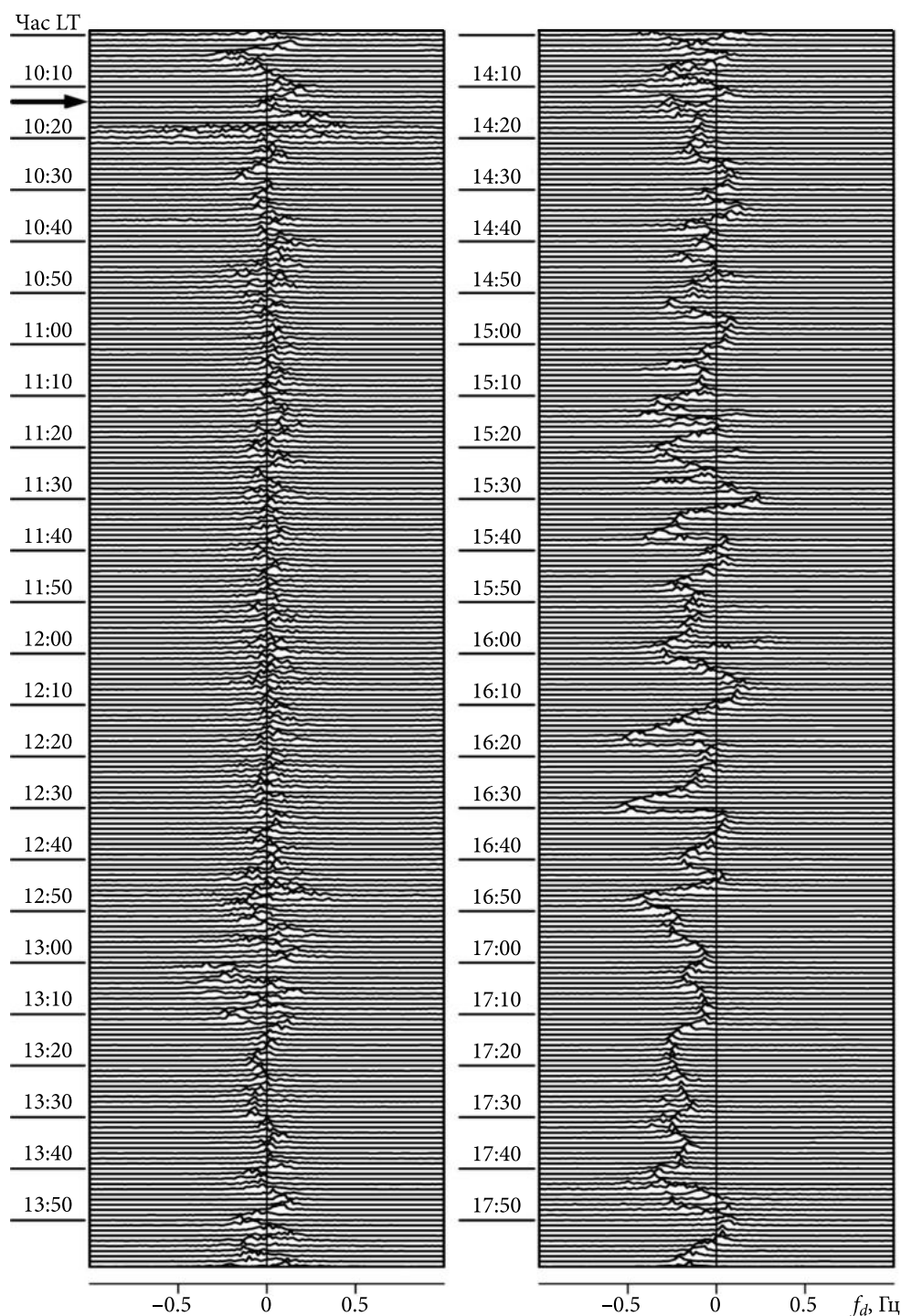


Рис. 6. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети *Falcon 9* 11 березня 2021 р. о 10:13 з космодрому Канаверал: частота 3.2 МГц; діапазон діючих висот 225...300 км; діапазон дійсних висот 135...165 км

В інтервалах часу 09:50–10:55 та 10:55–11:50 спостерігалось спочатку уширення ДС, а потім і їх «розвал». З 12:00 до 14:00 $f_d \approx 0$ Гц. Після 13:30 мав місце слабо виражений квазіперіодичний процес з $T \approx 10$ хв і $f_{da} \approx 0.1$ Гц.

Космодром Канаверал. Американська ракета *Falcon 9* стартувала 11 березня 2021 р. о 10:13 (вночі за американським часом). До 12:40 відзначалося уширення ДС (рис. 6). В інтервалі часу 12:40–13:14 спостерігався їх «розвал». Піс-

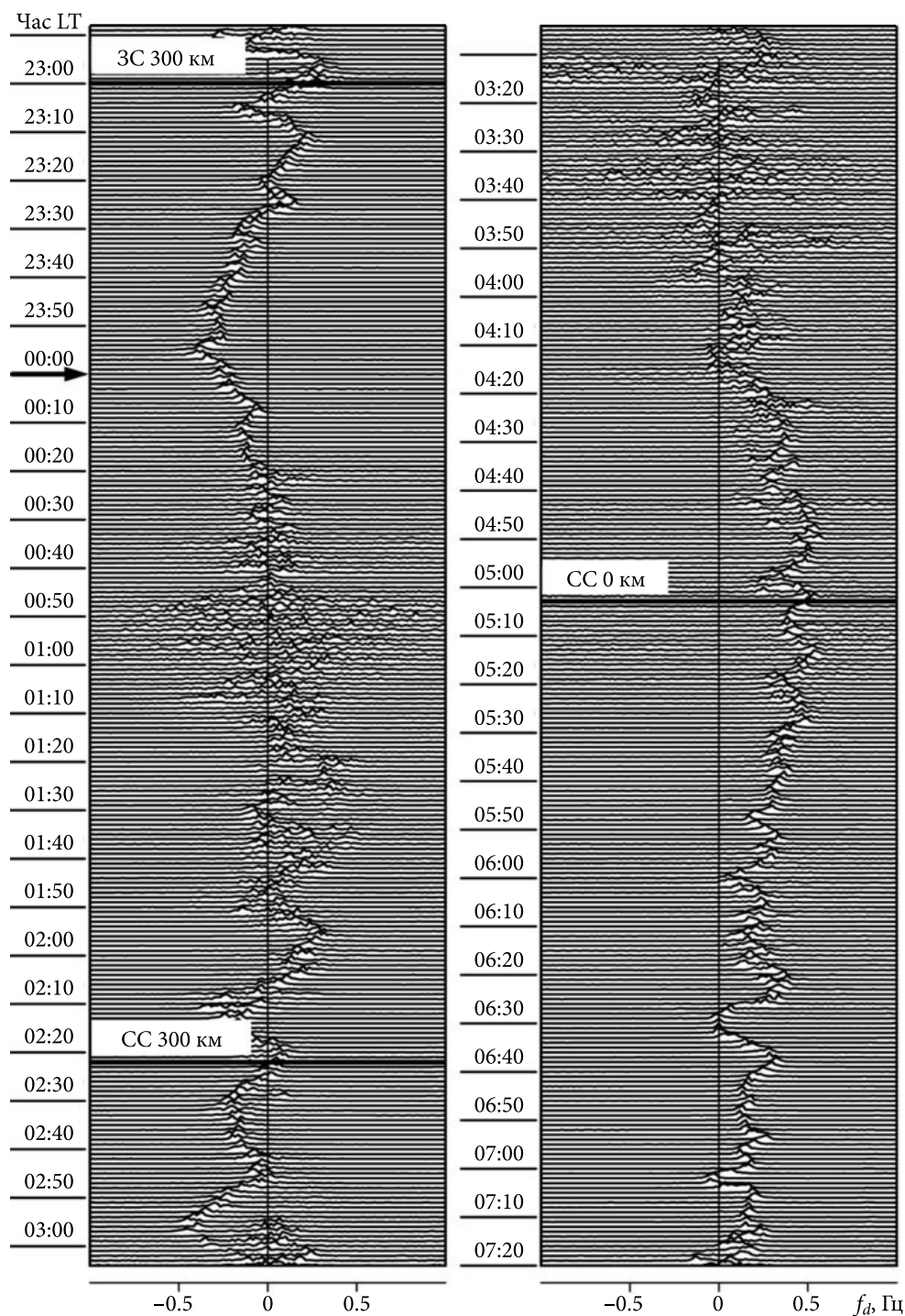


Рис. 7. Часові варіації ДС, що супроводжували старт ракети *Falcon 9* 30 липня 2021 р. о 00:00 з космодрому Куру: частота 3.2 МГц; діапазон діючих висот 225...300 км; діапазон дійсних висот 175...225 км

ля 13:40 варіації ДЗЧ стали квазіперіодичними з $T \approx 5...7$ хв і $f_{da} \approx 0.2$ Гц. Характер коливань змінювався близько 15:30, 16:50 та 17:40.

Космодром Куру. Старт європейської ракети *Ariane 5* відбувся 30 липня 2021 р. о 00:00 (для

Французької Гвіани — вдень). До 00:20 в іоносфері спостерігалися квазіперіодичні коливання ДЗЧ (рис. 7). В інтервалі часу 00:20—01:50 відзначався частковий або повний «розвал» спектрів. З 01:50 до 03:00 мали місце квазіперіодичні ва-

ріації ДЗЧ з $T \approx 20$ хв і $f_{da} \approx 0.20 \dots 0.23$ Гц. В інтервалі часу 03:00–04:00 спостерігався повний «розвал» ДС, а з 04:00 до 04:45 — частковий. В інтервалі часу 04:45–06:15 варіації ДЗЧ були скоріше хаотичними, а після 06:15 — квазіперіодичними з $T \approx 15$ хв і $f_{da} \approx 0.15 \dots 0.20$ Гц.

4. Обговорення

Якщо описані вище зміни характеру сигналу пов'язані зі стартом і польотом ракети, то, знаючи момент старту та приходу збурення до місця спостереження, можна оцінити час запізнювання Δt кожного збурення і характерну горизонтальну швидкість поширення:

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}.$$

Тут R — відстань між місцем генерації та місцем спостереження збурення, Δt_0 — час руху ракети до області генерації збурення. Вважатимемо, що R близьке до відстані між космодромом і обсерваторією (див. табл. 2), а $\Delta t_0 \approx 5$ хв — час руху ракети до висоти $z \approx 100$ км.

Знаючи амплітуду f_{da} та період T , можна оцінити відносну амплітуду збурень концентрації електронів з наступного співвідношення [33, 34]:

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L} \frac{f_{da}}{f},$$

де c — швидкість світла у вакуумі; L — товщина шару іоносфери, що дає основний внесок у ДЗЧ. Далі приймалося, що $L \approx 30$ км.

Швидкість поширення збурень. Космодром Плесецьк — найближчий до місця спостереження. Можливі часи запізнювання та вдавані швидкості поширення збурень наведені в табл. 3. Видно, що v змінювалася від ~ 1 км/с до $130 \dots 240$ м/с. Більш повільні збурення були квазіперіодичними.

При старті ракети «Союз» з космодрому Байконур спостерігалися можливі часи запізнювання 20, 57, 75 і 115 хв, а отже, швидкості близько 2.7 км/с, 770, 570 і 360 м/с (див. рис. 3). Останні дві швидкості близькі до швидкостей, що відзначалися під час старту ракети «Союз» із космодрому Плесецьк. Для ракети «Протон М» мали місце швидкості близько 555, 240 та 170 м/с.

Можливі швидкості поширення збурень під час польоту ракети *Long March 5B* становили 560, 410 і 270 м/с.

Для найбільш віддалених космодромів відзначалися швидкості 1100, 760, 510, 390 та 350 (Канаверал), а також 1500, 910, 680 і 450 м/с (Куру). Близькі швидкості 390 та 350 м/с могли відповідати одній групі хвиль.

Цікаво порівняти швидкості збурень, зареєстровані на частотах 3.2 та 4.2 МГц (див. рис. 1, 2). Для більшої частоти маємо більшу швидкість поширення (див. табл. 3). Річ у тім, що радіохвилі з

Таблиця 2. Основні відомості про досліджені старты ракет

Параметри	Космодром				
	Плесецьк (Російська Федерація)	Байконур (Республіка Казахстан)	Веньчан (КНР)	Канаверал (США)	Куру (Європейське космічне агентство)
Координати космодрому	63° пн. ш. 40.7° сх. д.	45.6° пн. ш. 63.3° сх. д.	19.6° пн. ш. 109.5° сх. д.	28.5° пн. ш. 80.5° зах. д.	5° пн. ш. 52.7° зах. д.
Відстань від місця спостережень, км	1500	2050	7200	9300	9500
Тип ракети	«Союз-2.1»	«Протон М»	<i>Long March 5B</i>	<i>Falcon 9</i>	<i>Ariane 5</i>
Маса ракети, т	312	705...711	837	549	777
Довжина ракети, м	46.3	58.2	53.7	70	46...52
Максимальний діаметр, м	10.3	4.1 (7.4)	5.0	3.7	5.4
Тяга першого/другого ступеня, кН	1019 / 792	10780 / 2400	1020 / 176	7686 / 981	1115 / 27.4
Час роботи першого/другого ступеня, с	118 / 320	121 / 211	120 / 780	162 / 397	605 / 1100

цими частотами відбивалися відповідно на висотах $\sim 225 \dots 275$ і $275 \dots 325$ км. Збільшення швидкості з висотою властиве акустико-гравітаційним хвилям (АГХ), які модулюють концентрацію електронів і призводять до утворення рухомих іоносферних збурень. Останні реєструються доплерівським радаром.

Підкреслимо, що факт збільшення швидкості зі збільшенням висоти свідчить про те, що спостережувані швидкості описують збурення, які рухаються від джерела, тобто збурення з цими швидкостями справді викликані польотом ракети. Швидкості $\sim 1.1 \dots 1.5$ км/с спостерігалися і раніше [13–28, 33, 34]. Вони властиві аперіодичним збуренням, спричиненим ударним впливом ракетного струменя на атмосферно-іоносферне середовище. Швидкості від ~ 910 до ~ 170 м/с відповідають АГХ. Значення швидкості суттє-

во залежить від траєкторії хвилі, стану атмосфери, величини та напрямку атмосферного вітру, висоти спостереження збурення та низки інших чинників.

Період хвильових збурень. При старті ракети «Союз» у нічний час 9 вересня 2021 р. з часами запізнювання 80 та 78 хв реєструвалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодом $6 \dots 7$ хв та амплітудою близько 0.1 Гц. Сигнал надходив з висот $225 \dots 325$ км. Такі періоди на цих висотах відповідають низькочастотним коливанням інфразвуку. Період атмосферних гравітаційних хвиль на цих висотах більше $8 \dots 10$ хв. Важливо, що швидкість інфразвуку $330 \dots 340$ м/с трохи менше швидкості звуку на цих висотах. Зменшення зумовлене тим, що швидкість приходу завжди відрізняється від швидкості звуку через наявність вітру та особливості траєкторії хвилі.

Таблиця 3. Основні відомості про іоносферні збурення

Параметр збурення	Тип ракети				
	«Союз» (3.2 / 4.2 МГц)	«Протон М»	Long March 5B	Falcon 9	Ariane 5
Δt_1 , хв	30 / 27	—	—	150	110
v_1 , м/с	1000 / 1140	—	—	1100	1500
T_1 , хв	—	—	—	—	20
f_{da1} , Гц	—	—	—	—	0.20...0.23
δ_{N1} , %	—	—	—	—	6.0...6.9
Δt_2 , хв	60 / 55	77	220	210	180
v_2 , м/с	450 / 500	555	560	760	910
T_2 , хв	—	—	—	5...7	—
f_{da2} , Гц	—	—	—	0.2	—
δ_{N2} , %	—	—	—	1.5...2.1	—
Δt_3 , хв	80 / 78	—	290	330	240
v_3 , м/с	330 / 340	—	410	510	680
T_3 , хв	6...7	—	—	12...18	—
f_{da3} , Гц	0.1	—	—	0.2...0.3	—
δ_{N3} , %	0.9...1.1	—	—	3.6...8.1	—
Δt_4 , хв	113 / 110	174	440	400	375
v_4 , м/с	230 / 240	240	270	390	450
T_4 , хв	20...30	10	10	10	15
f_{da4} , Гц	0.2...0.3	0.1	0.1	0.1	0.15...0.20
δ_{N4} , %	6...14	1.5	1.5	1.5	3.4...4.5
Δt_5 , хв	200	234	—	450	—
v_5 , м/с	130	170	—	350	—
T_5 , хв	20...30	10	—	20	—
f_{da5} , Гц	0.25...0.30	0.2	—	0.2	—
δ_{N5} , %	7.5...13.5	3	—	6	—

Після старту ракети *Falcon 9* у денній іоносфері спостерігалися коливання з періодом 5...7 хв. Оскільки радіохвиля відбивалася на висотах не більше 150 км, такому періоду відповідають атмосферні гравітаційні хвилі, а не інфразвук. Значення швидкості 760 м/с свідчить на користь того, що це коливання навряд чи могло бути згенероване польотом ракети. Швидше за все, його спричинило інше джерело збурення. Що ж стосується швидкостей 510 і 390...350 м/с, вони цілком могли бути пов'язані зі стартом ракети *Falcon 9*.

Амплітуда хвильових збурень. Найбільша відносна амплітуда коливань концентрації електронів (~6...14 %) спостерігалася під час старту ракети з найближчого космодрому Плесецьк. При старті ракети з космодрому Байконур значення δ_N не перевищувало 1.5...3 %. При старті космічного апарату на космодромі Веньчан $\delta_N \approx 1.5$ %.

Враховуючи віддаленість космодрому Канаверал, значення $\delta_N \approx 1.5...2.1$ % видаються цілком адекватними. Що ж стосується відносних амплітуд 3.6...8.1 і 6 %, то, швидше за все, ці квазіперіодичні збурення пов'язані з іншим джерелом, а не з ракетою, що стартує. Це ж відноситься і до космодрому Куру. Значення 6...6.9 % видаються завищеними для $R \approx 9500$ км. Можливо, що старт ракети *Ariane 5* викликав квазіперіодичні збурення з $v \approx 450$ м/с, $T \approx 15$ хв і $\delta_N \approx 3.4...4.5$ %.

5. Основні результати

Старти та польоти ракет з різних космодромів світу могли помітно вплинути на ДЗЧ на відста-

нях від місця генерації збурень до місця їх спостереження $R \approx 1500...9500$ км.

При старті ракети з найближчого космодрому Плесецьк спостерігалася аперіодичне збурення, що мало швидкість близько 1000...1140 м/с і тривалість ~20 хв. Збурення, якому відповідало значення швидкості 450...500 м/с, також було аперіодичним.

При старті ракети з космодрому Плесецьк зареєстровано квазіперіодичне збурення з періодом 6...7 хв і швидкістю 330...340 м/с, яке переноситься довгохвильовим інфразвуком. Амплітуда відносного збурення концентрації електронів становила $\delta_N \approx 1$ %. Для атмосферних гравітаційних хвиль з періодом 20...30 хв $\delta_N \approx 6...14$ %.

При старті ракети «Протон М» спостерігалася три групи збурень, що мали швидкості близько 555, 240 і 170 м/с. У цьому випадку $\delta_N \approx 1.5...3$ %.

При старті ракети з космодрому Веньчан було відзначено три можливі групи збурень зі швидкостями 560, 410 і 270 м/с. Для квазіперіодичного збурення значення $\delta_N \approx 1.5$ %.

Збурення, зареєстровані після старту ракети *Falcon 9*, швидше за все, не пов'язані з польотом ракети, а викликані іншими джерелами.

Аперіодичні збурення, що послідували за стартом ракети *Ariane 5* і які мали швидкість поширення 910 і 680 м/с, могли бути пов'язані з польотом ракети. Не виключено, що з ним пов'язане і квазіперіодичне збурення, яке мало швидкість близько 450 м/с, період 15 хв і $\delta_N \approx 3.4...4.5$ %.

Робота частково підтримувалася у межах держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0124U000478).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Booker H.G. A local reduction of F region ionization due to missile transit. *J. Geophys. Res.* 1961. Vol. 66, Iss. 4. P. 1073—1079.
2. Jackson J.E., Whale H.A., and Bauer S.J. Local ionospheric disturbance created by a burning rocket. *J. Geophys. Res.* 1962. Vol. 67, Iss. 5. P. 2059—2061. DOI: 10.1029/JZ067i005p02059
3. Mendillo M., Hawkins G.S., and Klobuchar J.A. A Large-Scale Hole in the Ionosphere Caused by the Launch of Skylab. *Science*. 1975. Vol. 187, Iss. 4174. P. 343—346. DOI: 10.1126/science.187.4174.343
4. Mendillo M., Hawkins G.S., and Klobuchar J.A. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80, Iss. 16. P. 2217—2228. DOI: 10.1029/JA080i016p02217
5. Mendillo M. The effect of rocket launches on the ionosphere. *Adv. Space Res.* 1981. Vol. 1, Iss. 2. P. 275—290. DOI: 10.1016/0273-1177(81)90302-1
6. Zinn J., Sutherland C.D., Stone S.N., Duncan L.M., and Behnke R. Ionospheric effects of rocket exhaust products: HEAO-C and Skylab. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982. Vol. 44, Iss. 12. P. 1143—1171. DOI: 10.1016/0021-9169(82)90025-3
7. Wand R.H., and Mendillo M. Incoherent scatter observations of an artificially modified ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89, Iss. A1. P. 203—215. DOI: 10.1029/JA089iA01p00203

8. Mendillo M., Baumgardner J., Allen D.P., Foster J., Holt J., Ellis G.R.A., Klekociuk A., and Reber G. Spacelab-2 plasma depletion experiments for ionospheric and radio astronomical studies. *Science*. 1987. Vol. 238, Iss. 4831. P. 1260–1264. DOI: 10.1126/science.238.4831.1260
9. Mendillo M. Ionospheric holes: A review of theory and recent experiments. *Adv. Space Res.* 1988. Vol. 8, Iss. 1. P. 51–62. DOI: 10.1016/0273-1177(88)90342-0
10. Bernhardt P.A., Kashiwa B.A., Tepley C.A., and Noble S.T. Spacelab 2 Upper Atmospheric Modification Experiment Over Arecibo. I — Neutral Gas Dynamics. *Astrophys. Lett. Comm.* 1988. Vol. 27, Iss. 3. P. 169–181.
11. Bernhardt P., Swartz W., Kelly M., Sulzer M., and Noble S. T. Spacelab 2 Upper Atmospheric Modification Experiment over Arecibo. II — Plasma dynamics. *Astrophys. Lett. Comm.* 1988. Vol. 27, Iss. 3. P. 183–198.
12. Bernhardt P.A., Ballenthin J.O., Baumgardner J.L., Bhatt A., Boyd I.D., Burt J.M., Caton R.G., Coster A., Erickson P.J., Huba J.D., Earle G.D., Kaplan C.R., Foster J.C., Groves K.M., Haaser R.A., Heelis R.A., Hunton D.E., Hysell D.L., Klenzing J.H., Larsen M.F., Lind F.D., Pedersen T.R., Pfaff R.F., Stoneback R.A., Roddy P.A., Rodriguez S.P., San Antonio G.S., Schuck P.W., Siefing C.L., Selcher C.A., Smith S.M., Talaat E.R., Thomason J.F., Tsunoda R.T., and Varney R.H. Ground and Space-Based Measurement of Rocket Engine Burns in the Ionosphere. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2012. Vol. 40, Is. 5. P. 1267–1286. DOI: 10.1109/TPS.2012.2185814
13. Gritchin A.I., Dorohov V.L., Kapanin I.I., Karpachov A.I., Kostrov L.S., Leus S.G., Martynenko S.I., Mashtaler N.N., Milovanov Yu.B., Misyura V.A., Pakhomova O.V., Podnos V.A., Pokhilko S.N., Protopop E.N., Rozumenko V.T., Somov V.G., Tyrnov O.F., Fedorenko V.N., Fedorenko Yu.P., Tsybmal A.M., Chernogor L.F., Chulakov S.G., Shemet A.S. Complex radio-physical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft. *Фізика космічної плазми*. Київ: ДКАУ, 1995. С. 161–170.
14. Chernogor L.F., Garmash K.P., Kostrov L.S., Rozumenko V.T., Tyrnov O.F., and Tsybmal A.M. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. *Radio Phys. Radio Astron.* 1998. Vol. 3, Iss. 2. P. 181–190.
15. Костров Л.С., Розуменко В.Т., Чорногор Л.Ф. Доплерівське радіозондування збурень у середній іоносфері, що супроводжують старти та польоти космічних апаратів. *Радіофізика і радіоастрономія*. 1999. Т. 4, № 3. С. 227–246.
16. Костров Л.С., Розуменко В.Т., Чорногор Л.Ф. Результати доплерівських спостережень збурень у геокосмосі, що супроводжували польоти космічних апаратів. *Косм. наука технол.* 2003. Т. 9, додаток 2. С. 76–81. DOI: 10.15407/knit2003.02s.076
17. Костров Л.С., Розуменко В.Т., Чорногор Л.Ф. Доплерівське радіозондування збурень у Е- та F-областях іоносфери при стартах і польотах космічних апаратів. *Косм. наука технол.* 2002. Т. 8, додаток 2. С. 132–143. DOI: 10.15407/knit2002.02s.132
18. Бурмака В.П., Костров Л.С., Чорногор Л.Ф. Статистичні характеристики сигналів доплерівського ВЧ-радару під час зондування середньої іоносфери, збуреної стартами ракет та сонячним термінатором. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2003. Т. 8, № 2. С. 143–162.
19. Бурмака В.П., Таран В.І., Чорногор Л.Ф. Результати комплексних радіофізичних спостережень хвильових збурень у геокосмосі, що супроводжують старти та польоти ракет. *Косм. наука технол.* 2003. Т. 9, додаток 2. С. 57–61.
20. Бурмака В.П., Таран В.І., Чорногор Л.Ф. Комплексні радіофізичні дослідження хвильових збурень в іоносфері, що супроводжували старти ракет на тлі природних нестационарних процесів. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2004. Т. 9, № 1. С. 5–28.
21. Бурмака В.П., Таран В.І., Чорногор Л.Ф. Радарні спостереження хвильових процесів в іоносфері, що супроводжували польоти космічних апаратів. *Косм. наука технол.* 2004. Т. 10, № 5–6. С. 113–117.
22. Бурмака В.П., Чорногор Л.Ф., Черняк Ю.В. Хвильові збурення у геокосмосі, що супроводжували старти і польоти ракет «Союз» та «Протон». *Радіофізика і радіоастрономія*. 2005. Т. 10, № 3. С. 254–272.
23. Бурмака В.П., Чорногор Л.Ф. Комплексна діагностика іоносферної плазми, збуреної віддаленими стартами ракет. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2009. Т. 14, № 1. С. 26–44.
24. Гармаш К.П., Леус С.Г., Чорногор Л.Ф., Шамота М.О. Геомагнітні пульсації, що супроводжували старти ракет з різних космодромів світу. *Косм. наука технол.* 2009. Т. 15, № 1. С. 31–43.
25. Живолуп Т.Г., Чорногор Л.Ф. Іоносферні ефекти протягом польоту ракети «Протон»: результати вертикального зондування. *Косм. наука технол.* 2010. Т. 16, № 3. С. 25–31.
26. Живолуп Т.Г., Чорногор Л.Ф. Іоносферні ефекти протягом польотів ракети «Союз» у спокійних та магнітозбурених умовах. *Косм. наука технол.* 2010. Т. 16, № 3. С. 32–41.
27. Живолуп Т.Г., Чорногор Л.Ф. Порівняльний аналіз збурень в іоносфері, викликаних стартами ракет «Протон» та «Союз». *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. *Радіофізика та іоносфера: збірник наук. праць*. 2011. № 44. С. 18–26.
28. Чорногор Л.Ф., Живолуп Т.Г. Порівняльний аналіз іоносферних ефектів протягом польотів ракети «Протон» за різних станів космічної погоди. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2011. Т. 16, № 4. С. 394–403.
29. Kakinami Y., Yamamoto M., Chen C.-H., Watanabe S., Lin C., Liu J.-Y. and Habu H. Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013. Vol. 118, Iss. 8. P. 5184–5189. DOI: 10.1002/jgra.50508

30. Lin C.H., Lin J.T., Chen C.H., Liu J.Y., Sun Y.Y., Kakinami Y., Matsumura M., Chen W.H., Liu H., and Rau R.J. Ionospheric shock waves triggered by rockets. *Ann. Geophys.* 2014. Vol. 32, Iss. 9. P. 1145–1152. DOI: 10.5194/angeo-32-1145-2014
31. Ding F., Wan W., Mao T., Wang M., Ning B., Zhao B., and Xiong B. Ionospheric response to the shock and acoustic waves excited by the launch of the Shenzhou 10 spacecraft. *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41, Iss. 10. P. 3351–3358. DOI: 10.1002/2014GL060107
32. Nakashima Y., and Heki K. Ionospheric hole made by the 2012 North Korean rocket observed with a dense GNSS array in Japan. *Radio Sci.* 2014. Vol. 49, Iss. 7. P. 497–505. DOI: 10.1002/2014RS005413
33. Чорногор Л.Ф. Радіофізичні та геомагнітні ефекти стартів ракет: Монографія. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2009. 386 с.
34. Chernogor L.F., and Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, N. Y.: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. 542 p.
35. Lin C.C.H., Shen M.-H., Chou M.-Y., Chen C.-H., Yue J., Chen P.-C., and Matsumura M. Concentric traveling ionospheric disturbances triggered by the launch of a SpaceX Falcon 9 rocket. *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, Iss. 15. P. 7578–7586. DOI: 10.1002/2017GL074192
36. Chou M.-Y., Shen M.-H., Lin C.C.H., Yue J., Chen C.-H., Liu J.-Y., and Lin J.-T. Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the Launch of FORMOSAT-5 Satellite. *Space Weather*. 2018. Vol. 16, Iss. 2. P. 172–184. DOI: 10.1002/2017SW001738
37. Chou M.-Y., Lin C.C.H., Shen M.-H., Yue J., Huba J.D., and Chen C.-H. Ionospheric Disturbances Triggered by SpaceX Falcon Heavy. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, Iss. 13. P. 6334–6342. DOI: 10.1029/2018GL078088
38. Li G., Ning B., Abdu M.A., Wang C., Otsuka Y., Wan W., Lei J., Nishioka M., Tsugawa T., Hu L., Yang G., and Yan C. Daytime F-region irregularity triggered by rocket-induced ionospheric hole over low latitude. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2018. Vol. 5, Iss. 1. 11. DOI: 10.1186/s40645-018-0172-y
39. Ssessanga N., Kim Y.H., Choi B., and Chung J.-K. The 4D-var estimation of North Korean rocket exhaust emissions into the ionosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. Vol. 123, Iss. 3. P. 2315–2326. DOI: 10.1002/2017JA024596
40. Zhu J., Fang H., Xia F., Wan T., and Tan X. Numerical Simulation of Ionospheric Disturbance Generated by Ballistic Missile. *Adv. Math. Phys.* 2019. Vol. 2019. 7935067. DOI: 10.1155/2019/7935067
41. Savastano G., Komjathy A., Shume E., Vergados P., Ravanelli M., Verkhoglyadova O., Meng X., and Crespi M. Advantages of geostationary satellites for ionospheric anomaly studies: Ionospheric plasma depletion following a rocket launch. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11, Iss. 14. 1734. DOI: 10.3390/rs11141734
42. Bowden G.W., Lorrain P., and Brown M. Numerical Simulation of Ionospheric Depletions Resulting From Rocket Launches Using a General Circulation Model. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020. Vol. 125, Iss. 6. e2020JA027836. DOI: 10.1029/2020JA027836
43. Saha K., De B.K., Paul B., and Guha A. Satellite launch vehicle effect on the Earth's lower ionosphere: A case study. *Adv. Space Res.* 2020. Vol. 65, Iss. 11. P. 2507–2514. DOI: 10.1016/j.asr.2020.02.026
44. Zhu J., and Fang H. Research on the disturbance of ballistic missile to ionosphere by using 3D ray tracing method. *Adv. Space Res.* 2020. Vol. 65, Iss. 3. P. 933–942. DOI: 10.1016/j.asr.2019.10.028
45. Ma X., Fang H., Wang S., and Chang S. Impact of the ionosphere disturbed by rocket plume on OTHR radio wave propagation. *Radio Sci.* 2021. Vol. 56, Iss. 4. e2020RS007183. DOI: 10.1029/2020RS007183
46. Чорногор Л.Ф., Гармаш К.П., Поднос В.А., Тирнов О.Ф. Радіофізична обсерваторія Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна – засіб для моніторингу іоносфери у космічних експериментах. Космічний проект «Іоносат-Мікро». Київ: Академперіодика, 2013. С. 160–182.

Стаття надійшла 02.12.2021

REFERENCES

1. Booker, H.G., 1961. A local reduction of F region ionization due to missile transit. *J. Geophys. Res.*, **66**(4), pp. 1073–1079.
2. Jackson, J.E., Whale, H.A., and Bauer, S.J., 1962. Local ionospheric disturbance created by a burning rocket. *J. Geophys. Res.*, **67**(5), pp. 2059–2061. DOI: 10.1029/JZ067i005p02059
3. Mendillo, M., Hawkins, G.S., and Klobuchar, J.A., 1975. A Large-Scale Hole in the Ionosphere Caused by the Launch of Skylab. *Science*, **187**(4174), pp. 343–346. DOI: 10.1126/science.187.4174.343
4. Mendillo, M., Hawkins, G.S., and Klobuchar, J.A., 1975. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab. *J. Geophys. Res.*, **80**(16), pp. 2217–2228. DOI: 10.1029/JA080i016p02217
5. Mendillo, M., 1981. The effect of rocket launches on the ionosphere. *Adv. Space Res.*, **1**(2), pp. 275–290. DOI: 10.1016/0273-1177(81)90302-1
6. Zinn, J., Sutherland, C.D., Stone, S.N., Duncan, L.M., and Behnke, R., 1982. Ionospheric effects of rocket exhaust products: HEAO-C and Skylab. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **44**(12), pp. 1143–1171. DOI: 10.1016/0021-9169(82)90025-3
7. Wand, R.H., and Mendillo, M., 1984. Incoherent scatter observations of an artificially modified ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **89**(A1), pp. 203–215. DOI: 10.1029/JA089iA01p00203

8. Mendillo, M., Baumgardner, J., Allen, D.P., Foster, J., Holt, J., Ellis, G.R.A., Klekociuk, A., and Reber, G., 1987. Spacelab-2 plasma depletion experiments for ionospheric and radio astronomical studies. *Science*, **238**(4831), pp. 1260–1264. DOI: 10.1126/science.238.4831.1260
9. Mendillo, M., 1988. Ionospheric holes: A review of theory and recent experiments. *Adv. Space Res.*, **8**(1), pp. 51–62. DOI: 10.1016/0273-1177(88)90342-0
10. Bernhardt, P.A., Kashiwa, B.A., Tepley, C.A., and Noble, S.T., 1988. Spacelab 2 Upper Atmospheric Modification Experiment Over Arecibo. I — Neutral Gas Dynamics. *Astrophys. Lett. Comm.*, **27**(3), pp. 169–181.
11. Bernhardt, P., Swartz, W., Kelly, M., Sulzer, M., and Noble, S.T., 1988. Spacelab 2 Upper Atmospheric Modification Experiment over Arecibo. II — Plasma dynamics. *Astrophys. Lett. Comm.*, **27**(3), pp. 183–198.
12. Bernhardt, P.A., Ballenthin, J.O., Baumgardner, J.L., Bhatt, A., Boyd, I.D., Burt, J.M., Caton, R.G., Coster, A., Erickson, P.J., Huba, J.D., Earle, G.D., Kaplan, C.R., Foster, J.C., Groves, K.M., Haaser, R.A., Heelis, R.A., Hunton, D.E., Hysell, D.L., Klenzing, J.H., Larsen, M.F., Lind, F.D., Pedersen, T.R., Pfaff, R.F., Stoneback, R.A., Roddy, P.A., Rodriguez, S.P., San Antonio, G.S., Schuck, P.W., Siefing, C.L., Selcher, C.A., Smith, S.M., Talaat, E.R., Thomason, J.F., Tsunoda, R.T., and Varney, R.H., 2012. Ground and Space-Based Measurement of Rocket Engine Burns in the Ionosphere. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **40**(5), pp. 1267–1286. DOI: 10.1109/TPS.2012.2185814
13. Gritchin, A.I., Dorohov, V.L., Kapanin, I.I., Karpachov, A.I., Kostrov, L.S., Leus, S.G., Martynenko, S.I., Mashtaler, N.N., Milovanov, Yu.B., Misyura, V.A., Pakhomova, O.V., Podnos, V.A., Pokhilko, S.N., Protopop, E.N., Rozumenko, V.T., Somov, V.G., Tyrnov, O.F., Fedorenko, V.N., Fedorenko, Yu.P., Tsybal, A.M., Chernogor, L.F., Chulakov, S.G., Shemet, A.S., 1995. Complex radiophysical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft. *Space Plasma Physics*, pp. 161–170. Kyiv: SSAU Publ.
14. Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Kostrov, L.S., Rozumenko, V.T., Tyrnov, O.F., and Tsybal, A.M., 1998. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. *Radio Phys. Radio Astron.*, **3**(2), pp. 181–190.
15. Kostrov, L.S., Rozumenko, V.T., and Chernogor, L.F., 1999. Doppler Radar Measurements of the Disturbances in the Bottomside Ionosphere, Associated with Space Vehicle Launches and Maneuvering System Burns. *Radio Phys. Radio Astron.*, **4**(3), pp. 227–246.
16. Kostrov, L.S., Rozumenko, V.T., Chernogor, L.F., 2003. HF doppler observations of disturbances in geospace, which accompanied space vehicle launches. *Kosm. nauka tehnol.*, **9**(Supplement2), pp. 76–81. DOI: 10.15407/knit2003.02s.076
17. Kostrov, L.S., Rozumenko, V.T., Chernogor, L.F., 2002. Doppler radio sounding of disturbances in the E and F regions of the ionosphere during launches and flights of spacecraft. *Kosm. nauka tehnol.*, **8**(Supplement2), pp. 132–143. DOI: 10.15407/knit2002.02s.132
18. Burmaka, V.P., Kostrov, L.S., and Chernogor, L.F., 2004. Statistics of Signals of the HF Doppler Radar Sensing the Bottomside Ionosphere Disturbed by Rocket Launches and Solar Terminator. *Telecommunications and Radio Engineering*, **61**(2–6), pp. 150–177.
19. Burmaka, V.P., Taran, V.I., and Chernogor, L.F., 2003. Results of combined radio physical observations of wave disturbances in geospace which accompanied space vehicle launches and flights. *Kosm. nauka tehnol.*, **9**(Supplement2), pp. 57–61.
20. Burmaka, V.P., Taran, V.I., and Chernogor, L.F., 2004. Clustered-Instrument Studies of Ionospheric Wave Disturbances Accompanying Rocket Launches against the Background of Nonstationary Natural Processes. *Radio Phys. Radio Astron.*, **9**(1), pp. 5–28.
21. Burmaka, V.P., Taran, V.I., and Chernogor, L.F., 2004. Radar observations of wave-like disturbances in ionosphere, associated with space vehicle flights. *Space Sci. Technol.*, **10**(5–6), pp. 113–117.
22. Burmaka, V.P., Chernogor, L.F., and Tcherniak, Y.V., 2005. Geospace Wave Disturbances Accompanying "Soyuz" and "Proton" Launches and Flights. *Radio Phys. Radio Astron.*, **10**(3), pp. 254–272.
23. Burmaka, V.P., and Chernogor, L.F., 2009. Complex Diagnostics of Ionospheric Plasma Disturbed by Far Rocket Launches. *Radio Phys. Radio Astron.*, **14**(1), pp. 26–44.
24. Garmash, K.P., Leus, S.G., Chernogor, L.F., and Shamota, M.A., 2009. Geomagnetic pulsations associated with rocket launches from different cosmodromes of the world. *Space Sci. Technol.*, **15**(1), pp. 31–43.
25. Zhivolup, T.G., and Chernogor, L.F., 2010. Ionospheric effects during rocket "Proton" flight: results of vertical sounding. *Space Sci. Technol.*, **16**(3), pp. 15–21.
26. Zhivolup, T.G., and Chernogor, L.F., 2010. Ionospheric Effects During Flights of the Rocket "Soyuz" Under Magnetically Quiet and Magnetically Disturbed Conditions. *Space Sci. Technol.*, **16**(3), pp. 22–31.
27. Zhivolup, T.G., and Chernogor, L.F., 2011. Comparative analysis of the disturbances in the ionosphere, caused by rocket launches "Proton" and "Soyuz". *The Bulletin of NTU "KhPI". Radio Physics and Ionosphere*, **44**, pp. 18–26.
28. Chernogor, L.F., and Zhivolup, T.G., 2011. Comparative analysis of ionospheric effects as observed during "Proton" rocket flights under different space weather conditions. *Radio Phys. Radio Astron.*, **3**(2), pp. 139–148.
29. Kakinami, Y., Yamamoto, M., Chen, C.-H., Watanabe, S., Lin, C., Liu, J.-Y., and Habu, H., 2013. Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **118**(8), pp. 5184–5189. DOI: 10.1002/jgra.50508

30. Lin, C.H., Lin, J.T., Chen, C.H., Liu, J.Y., Sun, Y.Y., Kakinami, Y., Matsumura, M., Chen, W.H., Liu, H., and Rau, R.J., 2014. Ionospheric shock waves triggered by rockets. *Ann. Geophys.*, **32**(9), pp. 1145–1152. DOI: 10.5194/angeo-32-1145-2014
31. Ding, F., Wan, W., Mao, T., Wang, M., Ning, B., Zhao, B., and Xiong, B., 2014. Ionospheric response to the shock and acoustic waves excited by the launch of the Shenzhou 10 spacecraft. *Geophys. Res. Lett.*, **41**(10), pp. 3351–3358. DOI: 10.1002/2014GL060107
32. Nakashima, Y., and Heki, K., 2014. Ionospheric hole made by the 2012 North Korean rocket observed with a dense GNSS array in Japan. *Radio Sci.*, **49**(7), pp. 497–505. DOI: 10.1002/2014RS005413
33. Chernogor, L.F., 2009. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Engine Burn*. Monograph. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University Publ.
34. Chernogor, L.F., and Blaunstein, N., 2013. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, N. Y.: CRC Press. Taylor & Francis Group.
35. Lin, C.C.H., Shen, M.-H., Chou, M.-Y., Chen, C.-H., Yue, J., Chen, P.-C., and Matsumura, M., 2017. Concentric traveling ionospheric disturbances triggered by the launch of a SpaceX Falcon 9 rocket. *Geophys. Res. Lett.*, **44**(15), pp. 7578–7586. DOI: 10.1002/2017GL074192
36. Chou, M.-Y., Shen, M.-H., Lin, C.C.H., Yue, J., Chen, C.-H., Liu, J.-Y., and Lin, J.-T., 2018. Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the Launch of FORMOSAT-5 Satellite. *Space Weather*, **16**(2), pp. 172–184. DOI: 10.1002/2017SW001738
37. Chou, M.-Y., Lin, C.C.H., Shen, M.-H., Yue, J., Huba, J.D., and Chen, C.-H., 2018. Ionospheric Disturbances Triggered by SpaceX Falcon Heavy. *Geophys. Res. Lett.*, **45**(13), pp. 6334–6342. DOI: 10.1029/2018GL078088
38. Li, G., Ning, B., Abdu, M.A., Wang, C., Otsuka, Y., Wan, W., Lei, J., Nishioka, M., Tsugawa, T., Hu, L., Yang, G., and Yan, C., 2018. Daytime F-region irregularity triggered by rocket-induced ionospheric hole over low latitude. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **5**(1), 11. DOI: 10.1186/s40645-018-0172-y
39. Ssessanga, N., Kim, Y.H., Choi, B., and Chung, J.-K., 2018. The 4D-var estimation of North Korean rocket exhaust emissions into the ionosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **123**(3), pp. 2315–2326. DOI: 10.1002/2017JA024596
40. Zhu, J., Fang, H., Xia, F., Wan, T., and Tan, X., 2019. Numerical Simulation of Ionospheric Disturbance Generated by Ballistic Missile. *Adv. Math. Phys.*, **2019**, 7935067. DOI: 10.1155/2019/7935067
41. Savastano, G., Komjathy, A., Shume, E., Vergados, P., Ravanelli, M., Verkhoglyadova, O., Meng, X., and Crespi, M., 2019. Advantages of geostationary satellites for ionospheric anomaly studies: Ionospheric plasma depletion following a rocket launch. *Remote Sens.*, **11**(14), 1734. DOI: 10.3390/rs11141734
42. Bowden, G.W., Lorrain, P., and Brown, M., 2020. Numerical Simulation of Ionospheric Depletions Resulting From Rocket Launches Using a General Circulation Model. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **125**(6), e2020JA027836. DOI: 10.1029/2020JA027836
43. Saha, K., De, B. K., Paul, B., and Guha, A., 2020. Satellite launch vehicle effect on the Earth's lower ionosphere: A case study. *Adv. Space Res.*, **65**(11), pp. 2507–2514. DOI: 10.1016/j.asr.2020.02.026
44. Zhu, J., and Fang, H., 2020. Research on the disturbance of ballistic missile to ionosphere by using 3D ray tracing method. *Adv. Space Res.*, **65**(3), pp. 933–942. DOI: 10.1016/j.asr.2019.10.028
45. Ma, X., Fang, H., Wang, S., and Chang, S., 2021. Impact of the ionosphere disturbed by rocket plume on OTHR radio wave propagation. *Radio Sci.*, **56**(4), e2020RS007183. DOI: 10.1029/2020RS007183
46. Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Podnos, V.A., and 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". Kyiv, Ukraine: Academperiodika Publ., pp. 160–182.

Received 02.12.2021

L.F. Chernogor

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

LARGE-SCALE DISTURBANCES IN THE TERRESTRIAL IONOSPHERE, WHICH ACCOMPANIED THE LAUNCHES AND FLIGHTS OF POWERFUL ROCKETS

Subject and Purpose. The ionosphere is the main channel for the propagation of radio waves. Its condition is determined by the state of the atmospheric and space weathers, both of which depend on processes on the Sun, in the geospace, and in the Earth's atmosphere. A serious impact on the state of the atmospheric and the space weather is produced by launches and flights of powerful rockets. The purpose of this paper is to present the results of observations and analyses of the disturbances in the ionosphere that accompanied launches and flights of heavy rockets from various cosmodromes around the world.

Methods and Methodology. In order to monitor disturbances in the ionosphere, a vertical Doppler sounder was used. The radar is able to detect relative disturbances in the electron density about 10^{-3} to 10^{-2} per cent over oscillation periods of 10^2 to 10^3 s. The beat signal formed by the signal reflected from the ionosphere and the one from the local oscillator were subjected to spectral processing over time intervals of 1 min.

Results. As follows from the observational data, the rocket launch from the Plesetsk cosmodrome (RF) was accompanied by an aperiodic disturbance of electron density, of duration about 20 minutes and speed of 1000 to 1140 m/s. The disturbance with a speed of 450 to 500 m/s was also aperiodic. A quasi-periodic disturbance with a period of 6 to 7 min and speed of 330 to 340 m/s was carried by a long-wave infrasound. The amplitude of the relative disturbance in electron density was $\delta_N \approx 1$ per cent. For atmospheric gravity waves with periods of 20 or 30 min the relative disturbance in electron density was $\delta_N \approx 6$ to 14 per cent. At the start of the *Proton M* rocket, three groups of disturbances with speeds of 555, 240 and 170 m/s were observed. In their case, the estimate for δ_N is 1.5 to 3 per cent. During the rocket launch from the Wenchang (PRC) cosmodrome, three possible groups of disturbances were noted, with speeds of 560, 410 and 270 m/s. In the case of a quasiperiodic disturbance, an estimate for δ_N is 1.5 per cent. The disturbances recorded after the launch of the *Falcon 9* rocket are, most likely, not related to the flight of the rocket. The aperiodic disturbances that followed the launch of the *Ariane 5* rocket could be associated with the flight of the rocket.

Conclusions. The disturbances that accompanied launches and flights of heavy rockets from several cosmodromes located at distances of 1500 to 2500 km from the observation site have been reliably identified.

Keywords: rocket flight, large-scale disturbance, ionosphere, aperiodic and quasiperiodic disturbance, electron density.