

<https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062>

УДК 550.388

Y. LUO, аспірант

ORCID ID: 0000-0002-3376-5814

E-mail: yiyangluo@163.com

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

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

Є. Г. ЖДАНКО, аспірант, мол. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-4612-4194

E-mail: eugenezhd@gmail.com

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

## ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ РАКЕТ, ЩО СТАРТУЮТЬ НА ФОНІ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

*Іоносферні ефекти, викликані стартами та польотами крупних ракет, вивчаються понад шість десятиліть. Проте до статньо повних і адекватних моделей генерації та поширення збурень у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера в цілому, що викликаються стартами та польотами великих ракет, у даний час немає. Виявляється, що ціла низка фізичних ефектів під час іоносферних бур і стартів ракет подібні. Тому наявність іоносферної бурі суттєво ускладнює пошук реакції іоносфери на запуски космічних апаратів.*

*Мета роботи — опис результатів спостережень іоносферних процесів, що супроводжували старти та польоти ракет на фоні іоносферних бур. Для аналізу вимірювань залучено дані спостережень стану іоносфери до, під час та після запуску ракет «Союз» і «Протон» з космодрому Байконур (Республіка Казахстан). Спостереження велися у Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (поблизу м. Харків, Україна). Для вимірювань використовувалася доплерівський радар вертикального зондування. Спостереження виконано протягом 24-го циклу сонячної активності (2009—2021 рр.). Кількість стартів ракети «Союз» становить 81, ракети «Протон» — 53.*

*Виявлення реакції іоносфери на віддалений на 2000 км старт і політ крупної ракети на фоні геокосмічної бурі доплерівським методом зазвичай можливе при значенні індексу  $K_{pmax} \leq 5$ , а при більших величинах воно дуже ускладнене або взагалі неможливе. У низці випадків складно визначити реакцію навіть при  $K_{pmax} = 4$ . Для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети доплерівський радар повинен працювати у діапазоні частот від 1.5...2 до 4...6 МГц. Підтверджено реєстрацію кількох груп горизонтальних позірних (видимих) швидкостей поширення збурень: 1.7...3 км/с і більше, 700...1000, 300...700, 150...260 м/с.*

**Ключові слова:** старт ракети, іоносферний ефект, магнітна буря, іоносферна буря, аперіодичне збурення, квазіперіодичне збурення, час запізнення, позірна швидкість.

### ВСТУП

Іоносферні ефекти, що супроводжують старти та польоти великих ракет, вивчаються понад шість десятиліть. Оpubліковано десятки наукових ста-

тей та монографії (див., наприклад, [5, 6, 12, 13]). При цьому встановлено, що ефекти проявляються у всіх підсистемах системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) та

Цитування: Luo Y., Черногор Л. Ф., Жданко Є. Г. Ионосферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 62—85. <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062>

відрізняються великою різноманітністю [5, 13]. Параметри ефектів суттєво залежать від стану системи Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (СМСМІАЗ), атмосферно-космічної погоди, географічних координат космодромів і засобів спостереження, типу ракет, їхньої траєкторії та виду палива, а також низки інших факторів.

Наукова значущість дослідження реакції системи ЗАІМ на старті та польоти ракет полягає в тому, що вони сприяють кращому розумінню взаємодії підсистем у цій системі, механізмів генерації та перенесення збурень аж до глобальних відстаней.

Практична значущість досліджень пов'язана із впливом збурень від стартів і польотів ракет на середовище, екологічну обстановку в системі ЗАІМ, на характеристики радіохвиль різних діапазонів і, зрештою, на працездатність засобів телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування.

В даний час немає достатньо повних і адекватних моделей генерації та поширення збурень у системі ЗАІМ в цілому, що викликаються стартами та польотами великих ракет. Цим пояснюється актуальність даної роботи.

При пошуку реакції системи ЗАІМ на старті та польоти ракет спостереження, як правило, ведуться у спокійних умовах, при відсутності інших джерел збурення. Це вдається не завжди. Системи ЗАІМ і СМСМІАЗ часто виявляються збуреними. Найбільш сильним і значущим джерелом глобальних збурень є геокоосмічні бурі. Вони викликаються сонячними бурями, що супроводжуються спалахами, викидами корональної маси та генерацією високошвидкісних потоків. В результаті геокоосмічної бурі на Землі виникає магнітна буря (МБ), іоносферна буря (ІБ), атмосферна буря та електрична буря [7, 10].

Під час ІБ у 2...10 разів може збільшуватися або зменшуватися концентрація електронів  $N$ , значно збурюються температури електронів та іонів, порушується динамічний режим іоносферної плазми, активується взаємодія всіх підсистем у системі ЗАІМ, генеруються нестійкості та хвильові процеси різної фізичної природи.

При стартах і польотах ракет також зменшується  $N$ , виникають іоносферні «діри», генеруються нестійкості та хвильові процеси.

Таким чином, ціла низка фізичних ефектів під час ІБ і стартів ракет подібні. Наявність ІБ суттєво ускладнює пошук реакції іоносфери на запуски космічних апаратів.

Мета цієї роботи — опис результатів багаторічних спостережень іоносферних процесів, що супроводжували старті та польоти ракет на фоні ІБ впродовж 24-го циклу сонячної активності (2009—2021 рр.).

Спроби виділення реакції іоносфери на старті та польоти ракет на фоні геокоосмічних бур робилися і раніше [2, 3, 8, 14, 15]. Прояв характеристик збурень залежить від методу спостережень, оскільки різні радіофізичні методи реєструють різні параметри сигналу та досліджують різні області іоносфери. У цих роботах використовувалися методи часткових відбиттів, вертикального доплерівського зондування та вертикального зондування (іонозондовий метод). Встановлено, що реакція іоносфери на старті та польоти ракет суттєво залежить від стану атмосферно-космічної погоди. Можлива синергетична взаємодія ефектів стартів ракет та ІБ, їхнє взаємне посилення. Як і слід було очікувати, ефекти ІБ суттєво ускладнюють виділення ефектів стартів і польотів великих ракет. Потрібні подальші дослідження цієї проблеми. Для цього проведено багаторічні вимірювання та створено базу даних за 1991—2021 рр.

#### ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу вимірювань залучено дані спостережень за станом іоносфери до, під час та після запуску ракет «Союз» і «Протон» з космодрому Байконур. Основні відомості про ракети наведено у табл. 1—3. Ракети стартували в різний час доби за суттєво різної магнітної активності, а значить і різної збуреності іоносфери.

Спостереження велися у Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Для вимірювань використовувався доплерівський радар вертикального зондування. Основні параметри доплерівського радара: діапазон частот — 1... 24 МГц, потужність радіопередавального при-

Таблиця 1. Основні відомості про ракети «Союз» і «Протон»

Параметр	Ракета	
	«Союз»	«Протон»
Тип ракети	важка	важка
Початкова маса, т	312	705...711
Тяга нульового ступеня, кН	818	—
Час роботи нульового ступеня, с	140	—
Тяга першого ступеня, кН	1019	10780
Час роботи першого ступеня, с	118	121
Тяга другого ступеня, кН	792	2400
Час роботи другого ступеня, с	320	211
Тяга третього ступеня, кН	—	31
Час роботи третього ступеня, с	—	240.5...258.3

строю — 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 залежно від робочої частоти. Розрізнення за доплерівським 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  $F_1$ -шарах, а більша — у  $F_1$  і  $F_2$ -шарах.

Для забезпечення прийнятної розрізненості за висотою (20...30 км) для кожного відбитого сигналу застосовувалось стробування в діапазоні діючих висот 75...450 км, що відповідало діапазону істинних висот 75...225 км у денний і 75...325 км у нічний час. Спостереження вико-

Таблиця 2. Циклограма польоту ракети «Союз»

Стадія польоту	Час, с	Висота, км	Відстань від космодрому, км	Швидкість, км/с
Вертикальний підйом	8	~1	0	~0.1
Відділення нульового ступеня	119	48	44	1.8
Скидання ступок головного обтічника	151	78	96	2.1
Вимкнення двигуна першого ступеня	286	171	451	3.9
Вимкнення двигуна другого ступеня	522	200	1680	7.7
Відділення космічного апарата	527	200	1715	7.8

Таблиця 3. Циклограма польоту ракети «Протон»

Стадія польоту	Час, с	Висота, км	Відстань від космодрому, км	Швидкість, км/с
Вертикальний підйом	10	~1	0	~0.1
Максимальний швидкісний напір	65.5	11	15	0.465
Увімкнення першого ступеня	119	40	63	1.626
Відділення першого ступеня	123.4	42	70	1.726
Увімкнення другого ступеня	334.5	120	498	4.450
Розділення другого та третього ступенів	335.2	120	500	4.453
Увімкнення третього ступеня	337.6	120	510	4.460
Скидання головного обтічника	348.2	123	560	4.497
Вимкнення третього ступеня	588.3	150	2030	7.179
Відділення орбітального блоку	588.4	151	2031	7.182

нано протягом 24-го циклу сонячної активності (2009—2021 рр.). Кількість пусків ракети «Союз» становить 81, ракети «Протон» — 53. Спостереження за реакцією іоносфери виконувалося як до, так і після старту ракети протягом 6...12 год.

Застосування до часових варіацій сигналу биття прийнятого та опорного сигналів перетворення Фур'є на інтервалі часу 60 с дозволило побудувати часові залежності доплерівських спектрів (ДС) у діапазоні значень  $-1...+1$  Гц. Час

запізнення  $\Delta t$  можливої реакції іоносфери на старт і політ ракети визначався за змінами характеру варіацій ДС.

#### СТАН КОСМІЧОЇ ПОГОДИ

Стан космічної погоди будемо описувати за допомогою індексів  $K_p$ ,  $D_{st}$ ,  $F_{10.7}$  і  $W$ . Перелік значень цих індексів для дня зі стартом ракети, а також у сусідні дні наведено у табл. 4. Видно, що  $K_p$ -індекс набував значень 4-, 5-, 6 і 7-. Відпо-

Таблиця 4. Стан космічної погоди

Дата	Час старту ракети (UT)	Тип ракети	$K_p$	$D_{st}$		$F_{10.7}$	$W$
				min	max		
08.10.2019			1+ 1+ 1+ 1- 1- 1 2- 1	-10	4	67.0	0
09.10.2019	10:17:56	«Протон»	2- 2+ 2- 4- 1+ 2- 1 1+	-15	7	67.9	0
10.10.2019			1+ 4+ 4+ 2 1+ 3 1+ 2-	-27	7	67.3	0
02.06.2010			2 3- 1+ 1- 1+ 2- 1+ 2	-35	-17	76.1	18
03.06.2010	22:00:08	«Протон»	1+ 2- 2- 3+ 2+ 2- 3- 3+	-28	-9	76.8	21
04.06.2010			5- 4 2 3+ 2- 1 1+ 2-	-53	-21	74.0	28
28.09.2011			4+ 5- 4+ 2+ 4- 3 2- 1+	-68	-32	134.0	109
29.09.2011	18:31:59	«Протон»	6- 5 4- 2 3 3- 3- 2-	-56	-29	137.0	128
30.09.2011			3 0+ 0 0+ 1- 1- 3 3	-35	1	138.5	116
07.12.2013			2 1 2- 0 0+ 0+ 2 3-	-8	17	152.3	89
08.12.2013	12:12	«Протон»	6 6- 4- 2 2 3+ 3 2-	-66	13	160.6	95
09.12.2013			1- 0 0 0+ 1+ 2 1+ 1+	-28	-14	163.1	142
08.07.2012			2- 2- 2- 3 2+ 3- 2+ 4+	-10	18	183.7	117
09.07.2012	18:38:30	«Протон»	5- 4- 4+ 4- 7- 5+ 3+ 4+	-78	-27	179.6	122
10.07.2012			4- 2 3- 4- 3- 2 2+ 2	-65	-23	179.2	107
27.09.2017			3 3- 5- 4 4- 4- 6- 6+	-44	41	91.3	37
28.09.2017	18:52	«Протон»	5+ 6+ 7- 5- 4- 4 4- 5-	-56	-24	91.2	42
29.09.2017			3 2+ 2+ 3- 3+ 2- 2 3-	-28	-4	90.0	42
01.04.2010			3+ 3 2 2- 3+ 3 1+ 3-	-24	-3	79.1	22
02.04.2010	04:04:33	«Союз»	3 3- 4- 3 2 2 3 3-	-33	-8	76.1	22
03.04.2010			3- 1+ 1+ 1 2 3+ 3- 2+	-23	-6	77.4	24
24.03.2014			2- 0 1- 1 1 1+ 1- 0	-10	5	157.7	137
25.03.2014	21:17:23	«Союз»	0+ 0+ 0+ 2- 2- 1+ 3 3+	-8	16	152.0	136
26.03.2014			4- 1+ 4- 1+ 1- 1- 2- 1	-23	-3	152.5	112
14.06.2010			1+ 1 1+ 1 1- 1- 1 1-	-14	4	75.1	14

Дата	Час старту ракети (UT)	Тип ракети	$K_p$	$D_{st}$		$F_{10.7}$	$W$
				min	max		
15.06.2010	21:35:19	«Союз»	1- 1+ 2- 2+ 1+ 2+ 2+ 3	-10	17	72.3	0
16.06.2010			3+ 3+ 3 3+ 3 3+ 4- 3	-36	-13	73.9	0
24.09.2014			4- 4- 3- 4 4- 3+ 3 4	-40	-21	145.6	108
25.09.2014	20:25	«Союз»	4- 2+ 2+ 3- 2 2- 2+ 3	-30	-11	167.8	144
26.09.2014			3 3+ 3- 3- 4 3+ 2 3	-40	-13	171.0	165
14.12.2015			2 2 1- 1 3 4+ 5- 5+	-47	26	120.2	86
15.12.2015	11:03:09	«Союз»	5- 4- 2+ 2- 3 3+ 1+ 3-	-38	-10	115.2	65
16.12.2015			4- 3 0+ 0+ 0 0+ 0+ 0+	-27	0	122.2	63
06.07.2016			0 0+ 0+ 1- 1- 1 1+ 3-	-3	21	79.7	13
07.07.2016	01:36:41	«Союз»	3- 3- 3- 3- 3+ 4+ 5- 4+	-17	21	86.1	25
08.07.2016			3+ 2+ 3+ 4- 4 4- 4 2+	-27	1	90.0	42

відно до класифікації [7, 10] таким значенням відповідають МБ наступних класів: вельми помірна, помірна, сильна та дуже сильна.

**РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЕФЕКТІВ СТАРТУ РАКЕТИ «ПРОТОН»**

**Вельми помірна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС для денного старту ракети «Протон» 9 жовтня 2019 р. о 10:17:56 (тут і надалі всесвітній час UT) в умовах вельми помірної МБ ( $K_{pmax} = 4-$ ) наведено на рис. 1. Видно, що у день старту хвильова активність була досить високою. Хвильові збурення спостерігалися постійно. Їхня амплітуда  $f_{da}$  не перевищувала 0.15 Гц, а період  $T$  становив 10...15 хв. Зміна характеру варіацій ДС спостерігалася з часом запізнення  $\Delta t$  відносно моменту старту ракети близько 22, 80, 137, 233 і 268 хв. Характер варіацій суттєво змінювався після заходу Сонця на висотах іоносфери (приблизно після 15:20).

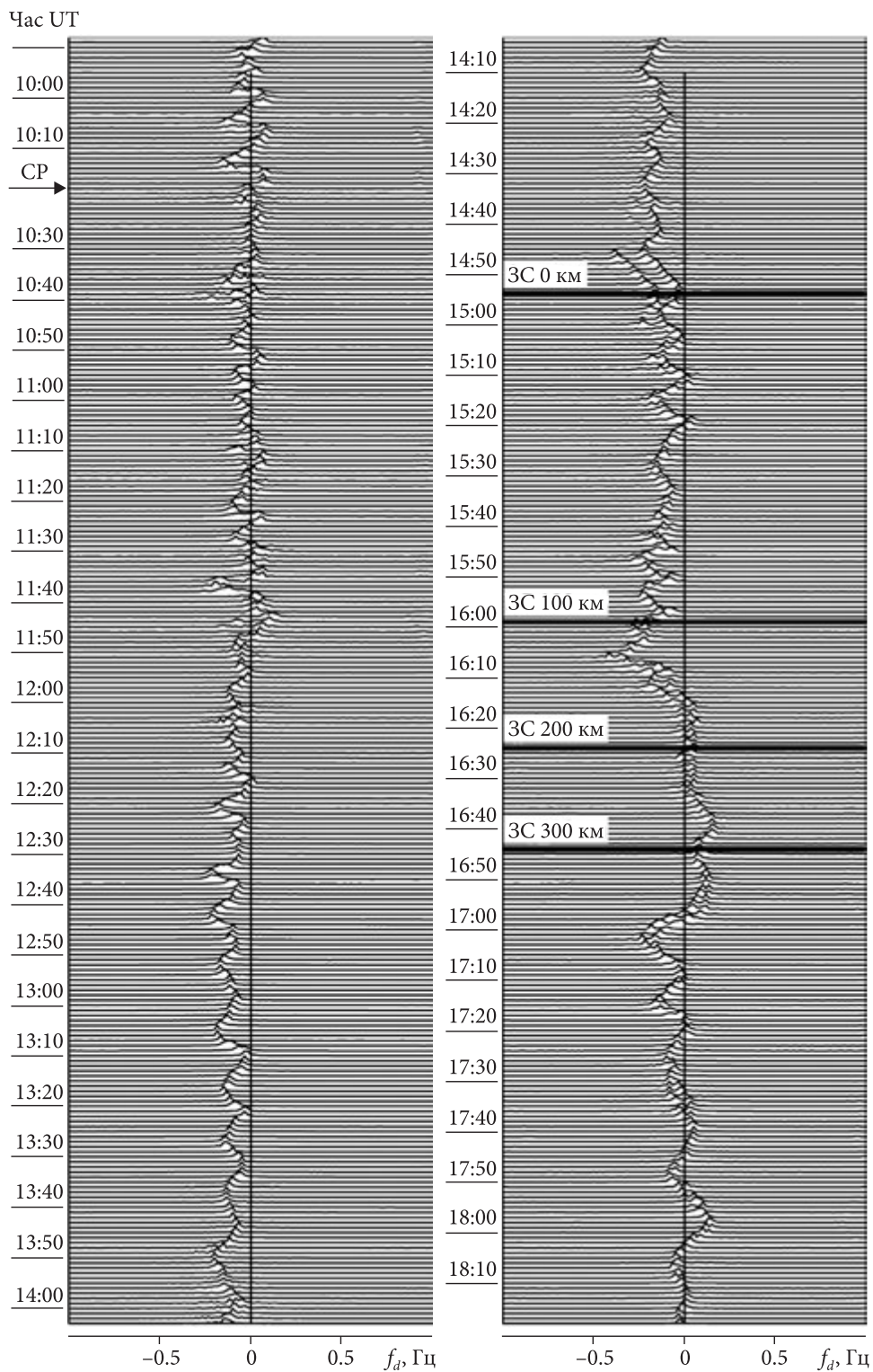
**Помірна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, що супроводжували нічний старт ракети «Протон» 3 червня 2010 р. о 22:00:08, наведено на рис. 2. Видно, що характер варіацій змінювався з часами запізнення 27, 52, 75 і 148 хв. Приблизно після 00:28 відбитий сигнал, поступово зміщуючись з діючих висот

150...225 км до висот 375...450 км, перестав реєструватися. Після 01:00 з'явився слабкий відбитий сигнал. Область відбиття поступово зміщувалася вниз, і відбитий сигнал з діючих висот 150...225 км знову з'явився близько 01:48.

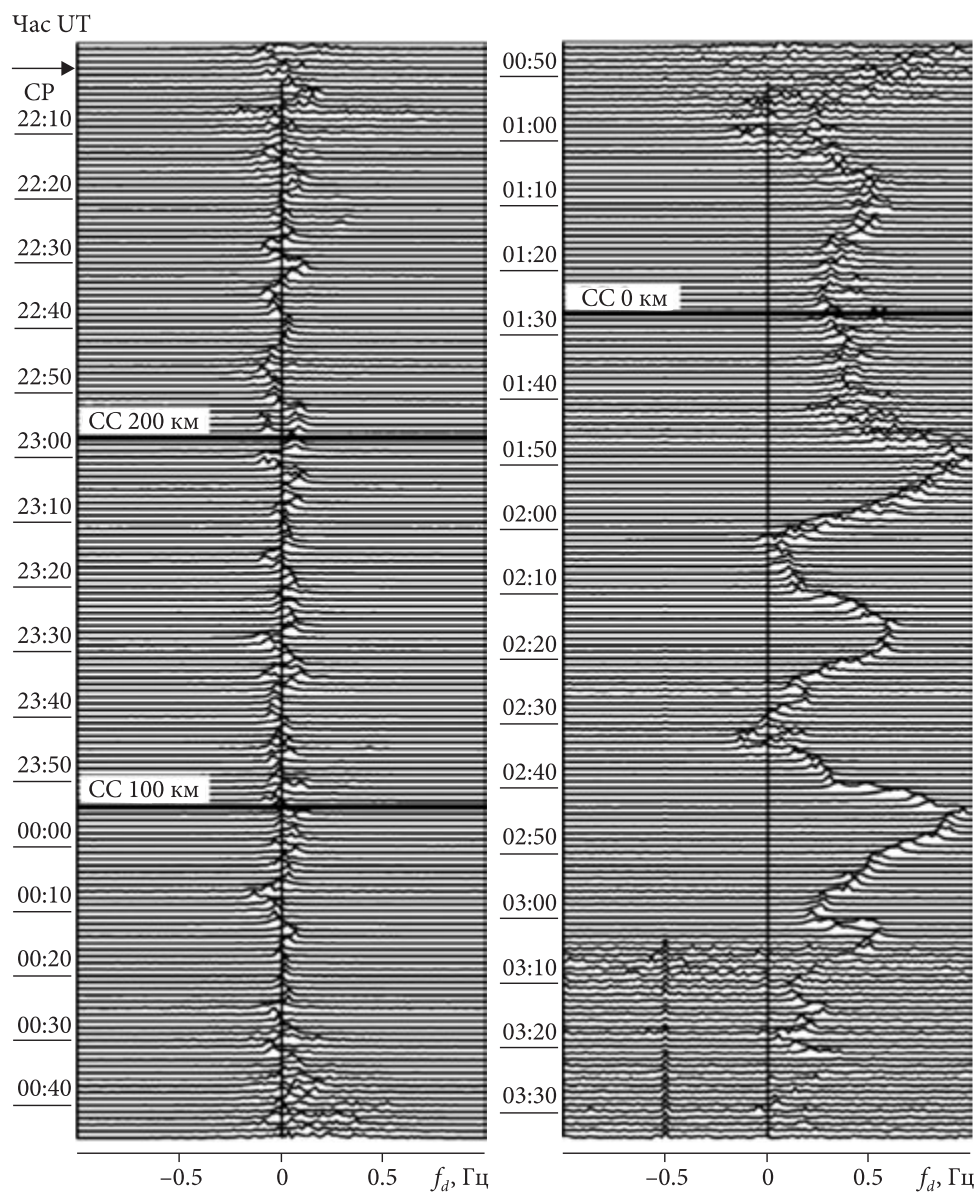
Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц протягом того ж часу показано на рис. 3. Видно, що характер варіацій змінювався з часами запізнення близько 25, 50, 70 і 135 хв. Відбитий сигнал був відсутній у всіх каналах з 00:15 до 02:50.

**Сильна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС, які супроводжували нічний старт ракети «Протон» 29 вересня 2011 р. о 18:31:59, наведено на рис. 4. Протягом усього часу спостережень мало місце або розширення ДС, або їхнє «розсипання». Сильно змінювався період квазіперіодичних збурень ДС. Часто варіації були аперіодичними. На частоті 3.2 МГц зміни характеру варіацій спостерігалися через 10, 93 і 173 хв після старту ракети. На частоті 4.2 МГц вони дорівнювали 10, 84 і 170 хв.

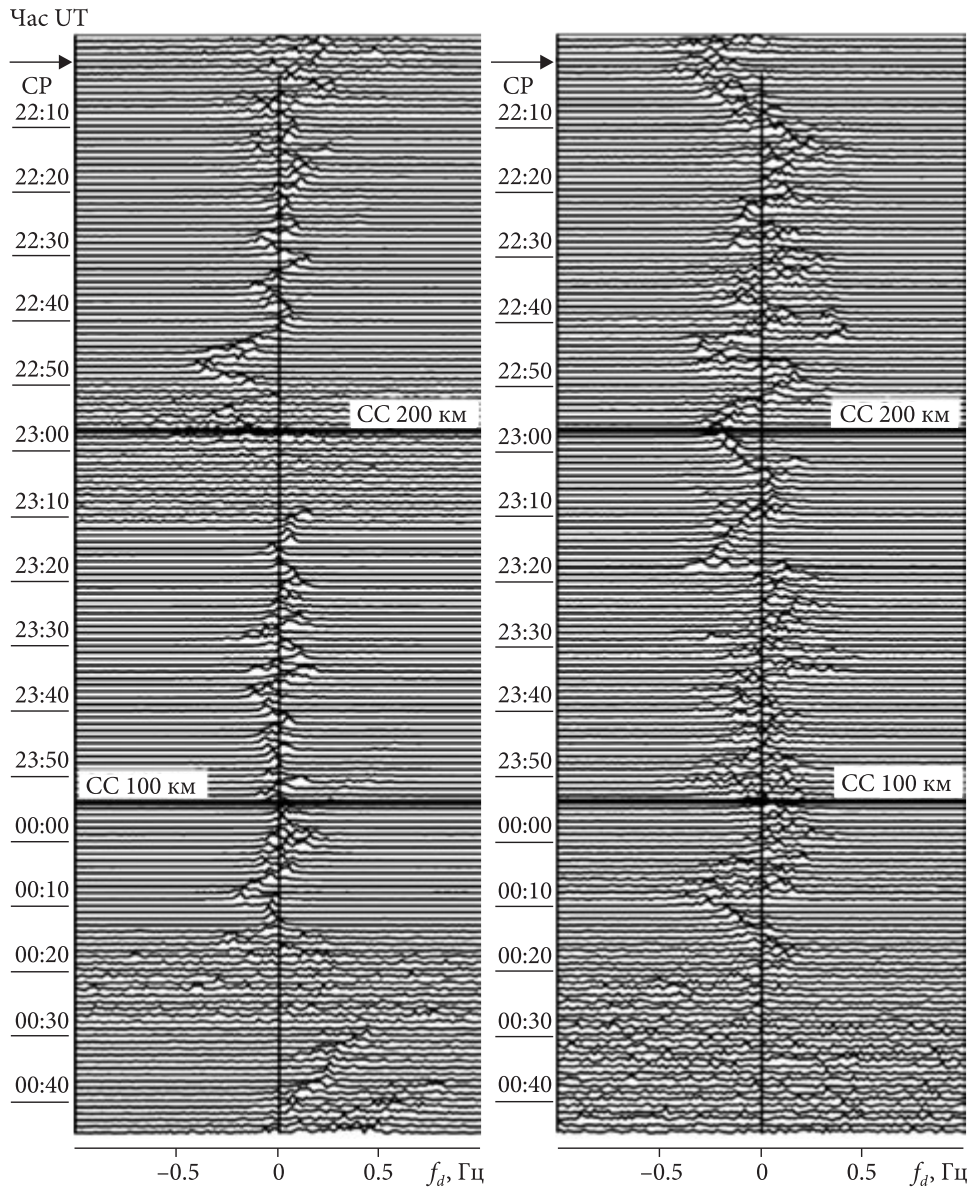
**Сильна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС, які реєструвалися під час вечірнього старту ракети «Протон» 8 грудня 2013 р. о 12:12, показано на рис. 5. Видно, що протягом усього часу спостережень хвильова активність була сильною: амплітуда  $f_{da}$  досягала 0.5...0.6 Гц, пе-



**Рис. 1.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у денний час 9 жовтня 2019 р. о 10:17:56 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км. Тут і далі ЗС – захід Сонця

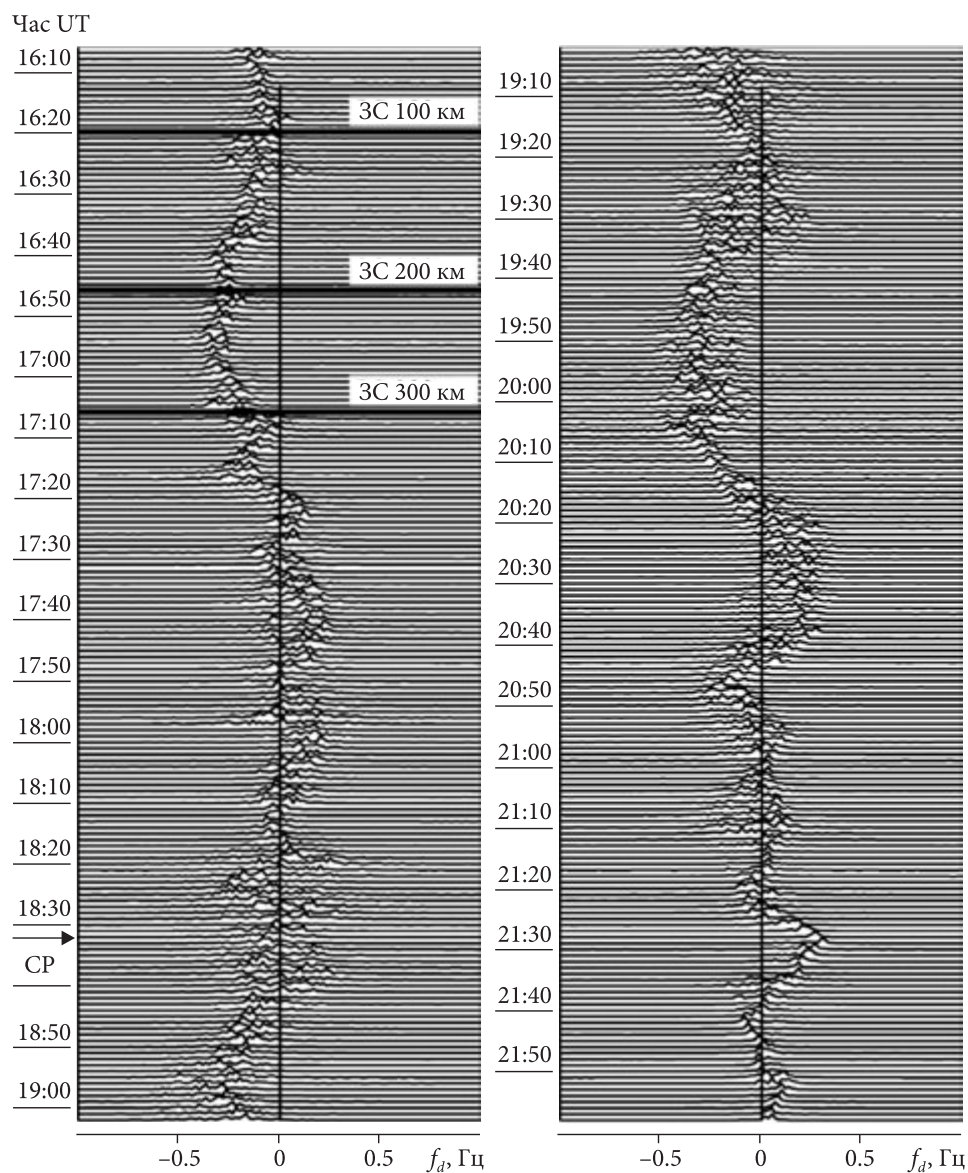


**Рис. 2.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у нічний час 3 червня 2010 р. о 22:00:08 UT. Діапазон діючих висот 150...225 км (ліворуч) і 375...450 км (праворуч). Тут і далі СС – схід Сонця

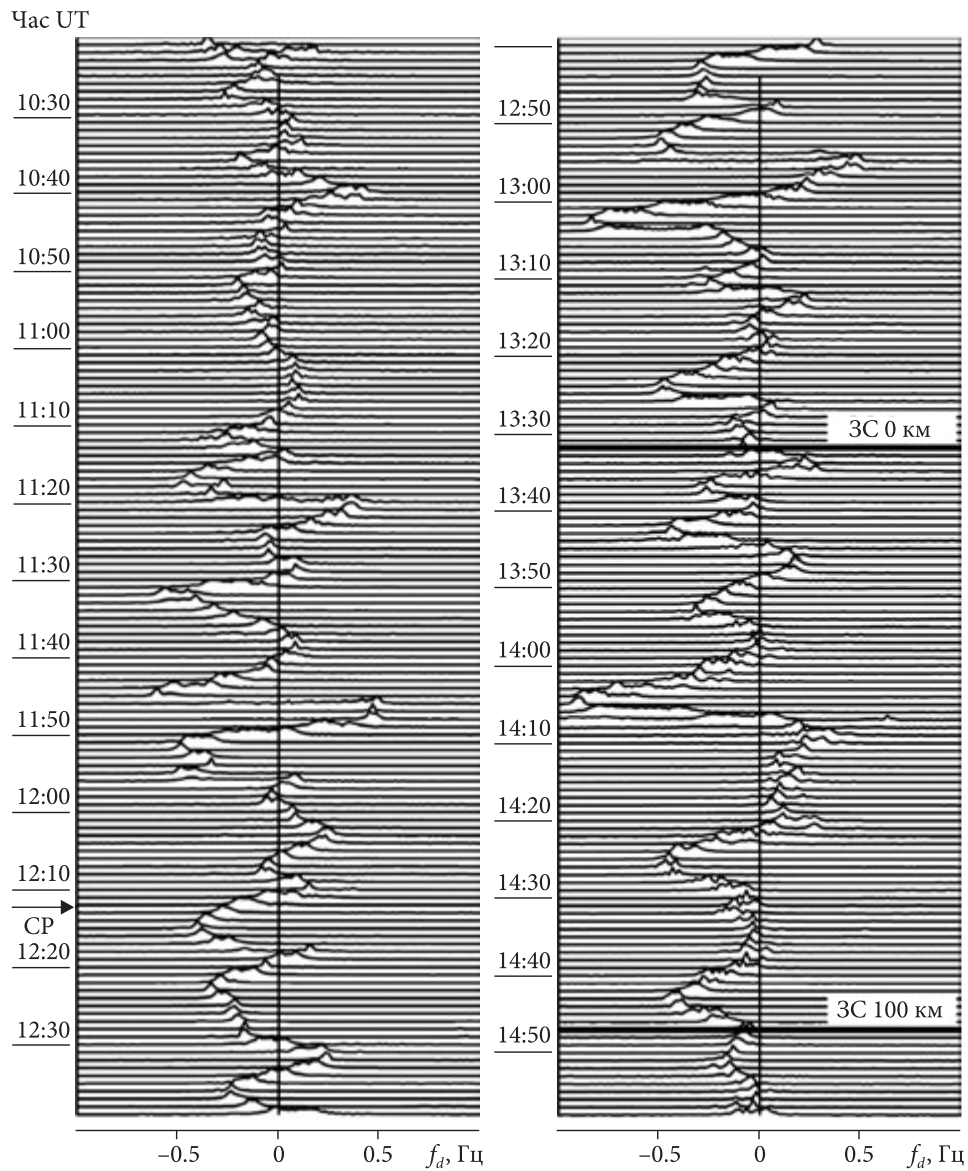


**Рис. 3.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у нічний час 3 червня 2010 р. о 22:00:08 UT. Діапазон діючих висот 150...225 км (ліворуч) і 375...450 км (праворуч)

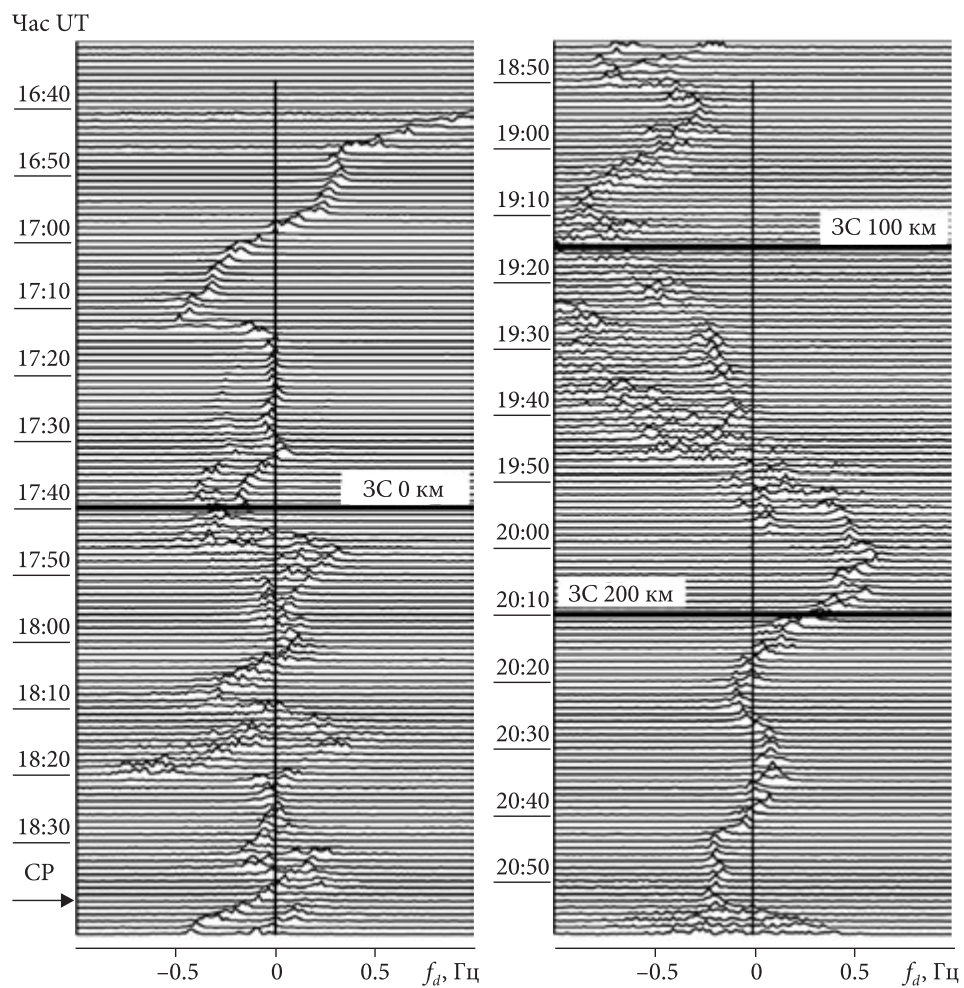




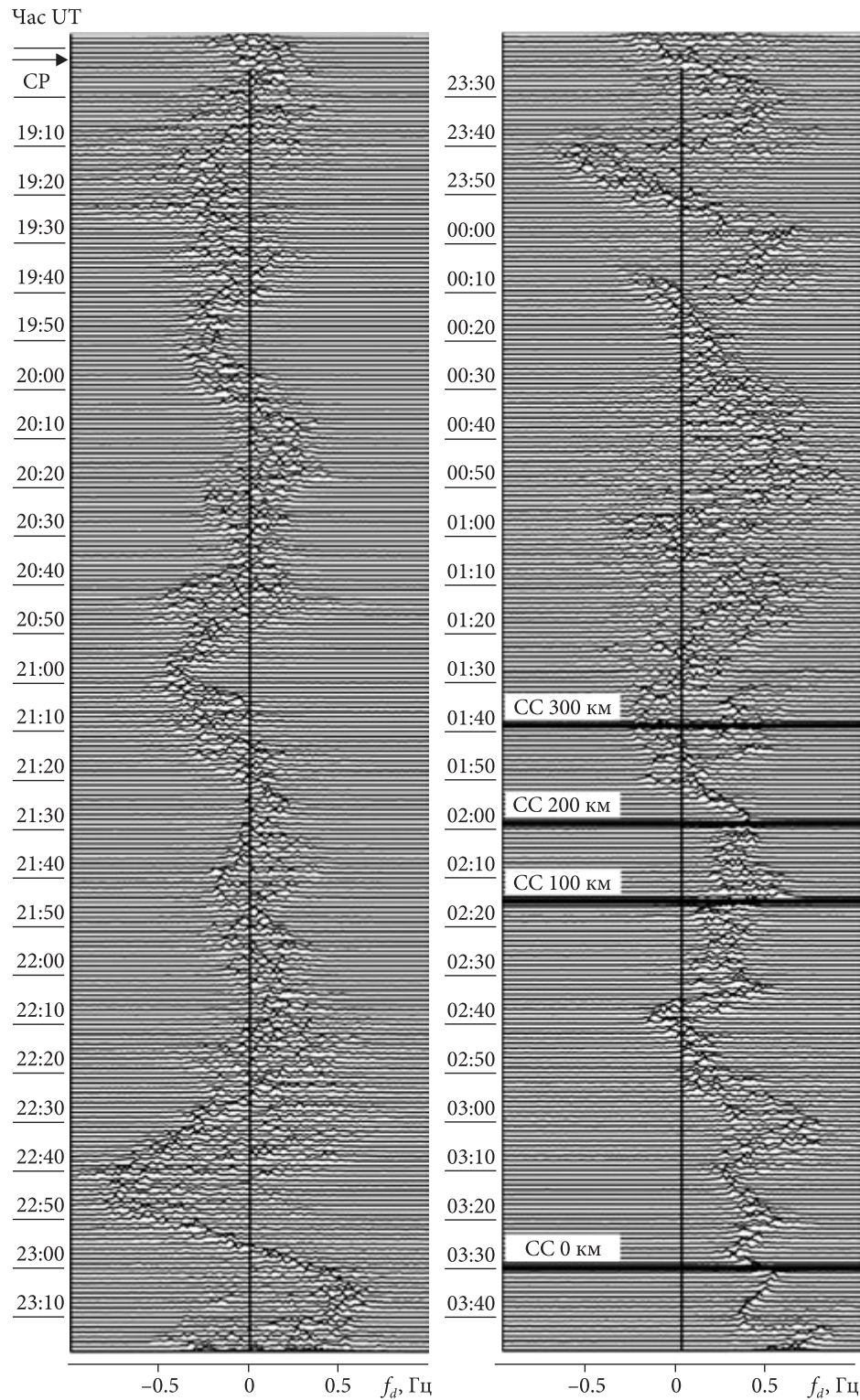
**Рис. 4.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у нічний час 29 вересня 2011 р. о 18:31:59 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



**Рис. 5.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у денний час 8 грудня 2013 р. о 12:12 UT. Діапазон діючих висот 225...300 км



**Рис. 6.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у вечірній час 9 липня 2012 р. о 18:38:30 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



**Рис. 7.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у вечірній час 28 вересня 2017 р. о 18:52 UT. Діапазон діючих висот 375...450 км

ріод  $T \approx 10$  хв. Виявити зміну характеру варіацій важко. Імовірно, вона спостерігалася через 14, 48, 65, 107 і 130 хв після старту ракети. На можливих ефекти старту ракети накладлися ефекти вечірнього сонячного термінатора.

**Дуже сильна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, які супроводжували вечірній старт ракети «Протон» 9 липня 2012 р. о 18:38:30, наведено на рис. 6. Видно, що варіації ДС протягом усього часу спостережень були аперіодичними. Варіації ДЗЧ були значними: від  $-1$  до  $1$  Гц. Ефекти від старту ракети та вечірнього термінатора накладлися. Можливо, що реакція на старт ракети відмічалася з часом запізнення 14, 45 і 79 хв. Лише після 19:58 збурення стали квазіперіодичними з  $T \approx 23$  хв і  $f_{da} \approx 0.1...0.3$  Гц.

**Дуже сильна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС, що послідували за нічним стартом ракети «Протон» 28 вересня 2017 р. о 18:52, показано на рис. 7. Видно, що протягом всього часу спостереження мав місце ефект «розсіпання» ДС. Часи запізнення можливої реакції іоносфери на старт ракети становили 48, 118, і 208 хв. Амплітуда  $f_{da}$  досягала 0.5 Гц, а  $T \approx 25...30$  хв.

#### РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЕФЕКТІВ СТАРТУ РАКЕТИ «СОЮЗ»

**Вельми помірна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС, які супроводжували старт ракети «Союз» у перехідний час доби 2 квітня 2010 р. о 03:04:33, наведено на рис. 8. З рис. 8 можна бачити, що до 03:20 сигнал на частоті 4.2 МГц через низькі значення  $N$  у нічний час у період глибокого мінімуму сонячної активності був відсутній. Майже протягом усього часу спостережень ДС залишалися практично одномодовими. Зміна характеру варіацій ДС відмічалася через 25, 117 і 161 хв після старту ракети.

**Вельми помірна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС у період, близький до весняного рівнодення, наведено на рис. 9. Ракета «Союз» стартувала 25 березня 2014 р. о 21:17:23. ДС залишалися більш-менш одномодовими лише в окремих інтервалах часу (з 21:00 до 22:10 25 березня 2014 р., з 02:27 до 03:47 26 березня 2014 р.). У решті інтервалів часу спостерігалася «розси-

пання» спектрів. Пошук реакції на старт ракети був ускладнений. Можливі часи запізнення реакції іоносфери на старт космічного апарата становили 60, 103, 182 хв.

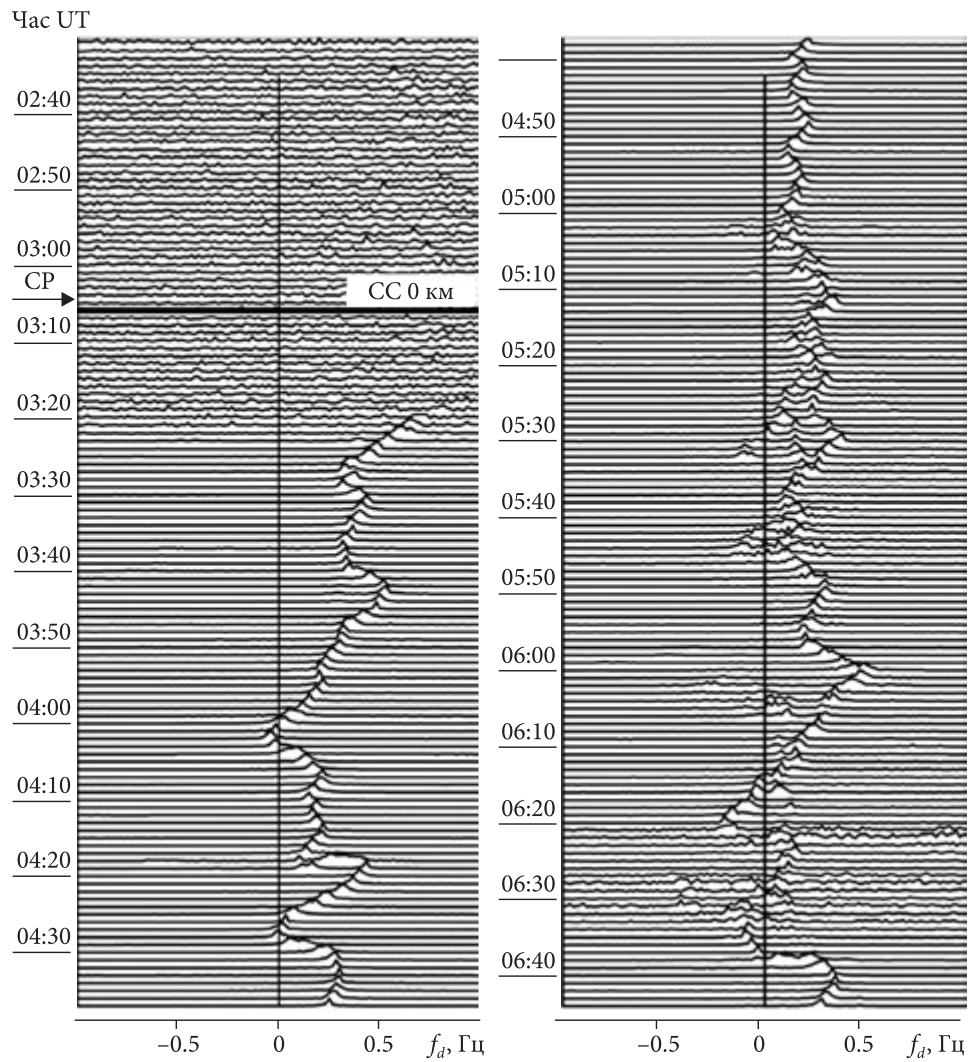
**Вельми помірна магнітна буря.** Нічний старт ракети «Союз» відбувся 15 червня 2010 р. о 21:35:19. Подія мала місце поблизу періоду літнього сонцестояння. При цьому Сонце на висотах понад 250 км не заходить. Приблизно до 22:00 відбитий сигнал на частотах 3.2 і 4.2 МГц був відсутній (рис. 10). Протягом усього часу існування ДС вони були розширеними, епізодично спостерігалася їхнє «розсіпання». Було складно визначити моменти часу запізнення реакції на старт ракети. Можливо, вона мала місце при  $\Delta t \approx 24, 73, 139$  і  $191$  хв, якщо судити з варіацій ДС на частоті 3.2 МГц. На частоті 4.2 МГц ці часи становили 24, 66, 139 і 191 хв.

**Вельми помірна магнітна буря.** Нічний старт ракети «Союз» мав місце 25 вересня 2014 р. о 20:25, поблизу періоду осіннього рівнодення. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, що настали за стартом ракети, показано на рис. 11. Видно, що поведінка ДС була нерегулярною. В окремих інтервалах часу сигнал взагалі був відсутній. Після 02:20 він став більш-менш регулярним. Визначення реакції іоносфери на запуск космічного апарата було ускладнено.

Поведінка ДС на частоті 4.2 МГц була схожою.

**Сильна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС, що реєструвались після денного старту ракети «Союз» 15 грудня 2015 р. о 11:03:09, тобто поблизу періоду зимового сонцестояння, показано на рис. 12. Можна бачити, що хвильова активність була високою, що властиво всім грудневим вимірюванням. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ після старту ракети збільшилася від  $0.20...0.25$  до  $0.4...0.5$  Гц. Квазіперіод суттєво не змінився і становив близько 10 хв. Зміна характеру сигналу мала місце з часами запізнення близько 11, 62, 103 і 150 хв.

**Сильна магнітна буря.** Приклад часових варіацій ДС у нічний час поблизу періоду літнього сонцестояння наведено на рис. 13. Ракета «Союз» стартувала 7 липня 2016 р. о 01:36:41. Приблизно з 01:00 і до 02:45 варіації ДС відрізнялися нерегулярністю. В інтервалі часу від 02:45



**Рис. 8.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 2 квітня 2010 р. о 03:04:33 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км

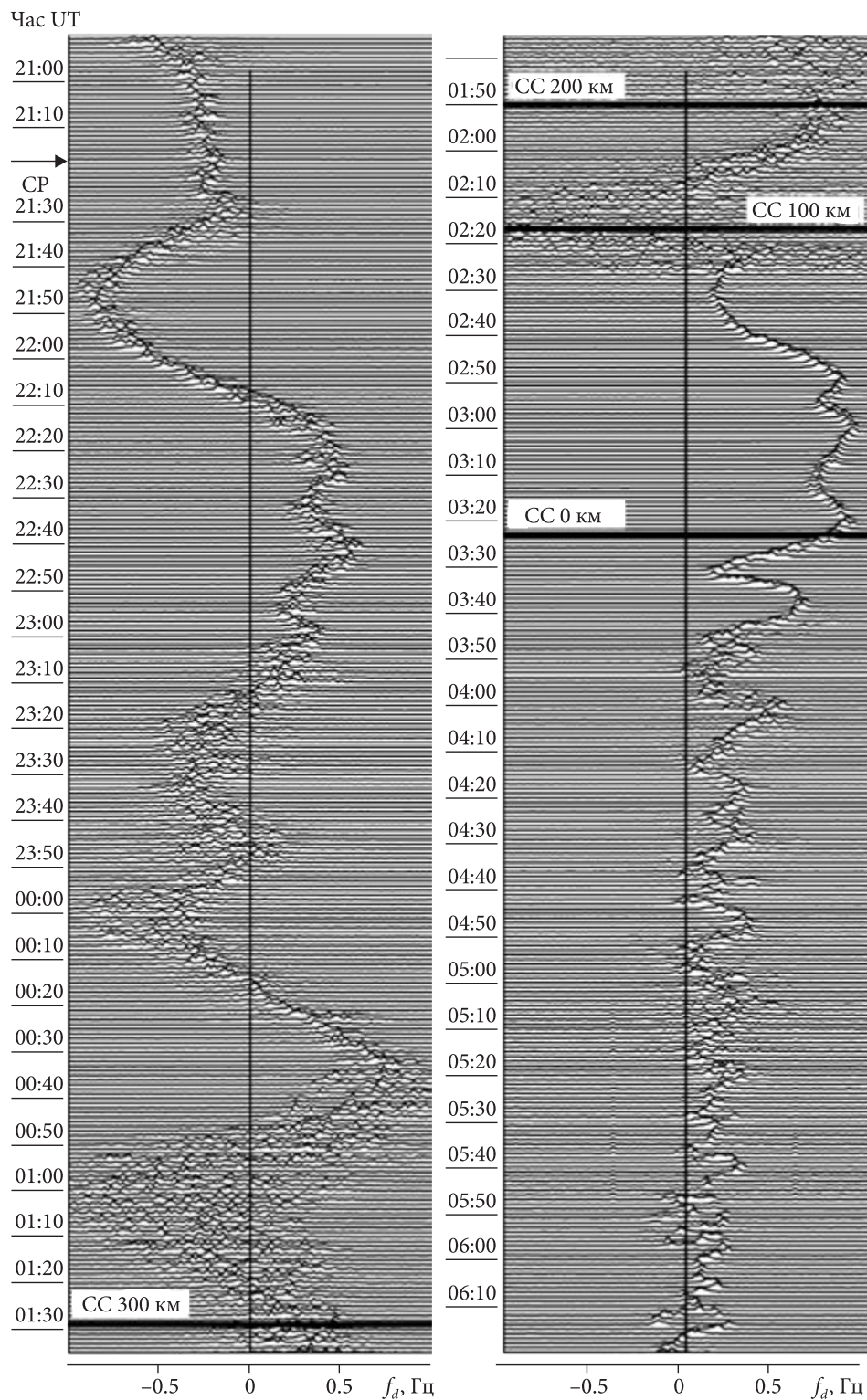
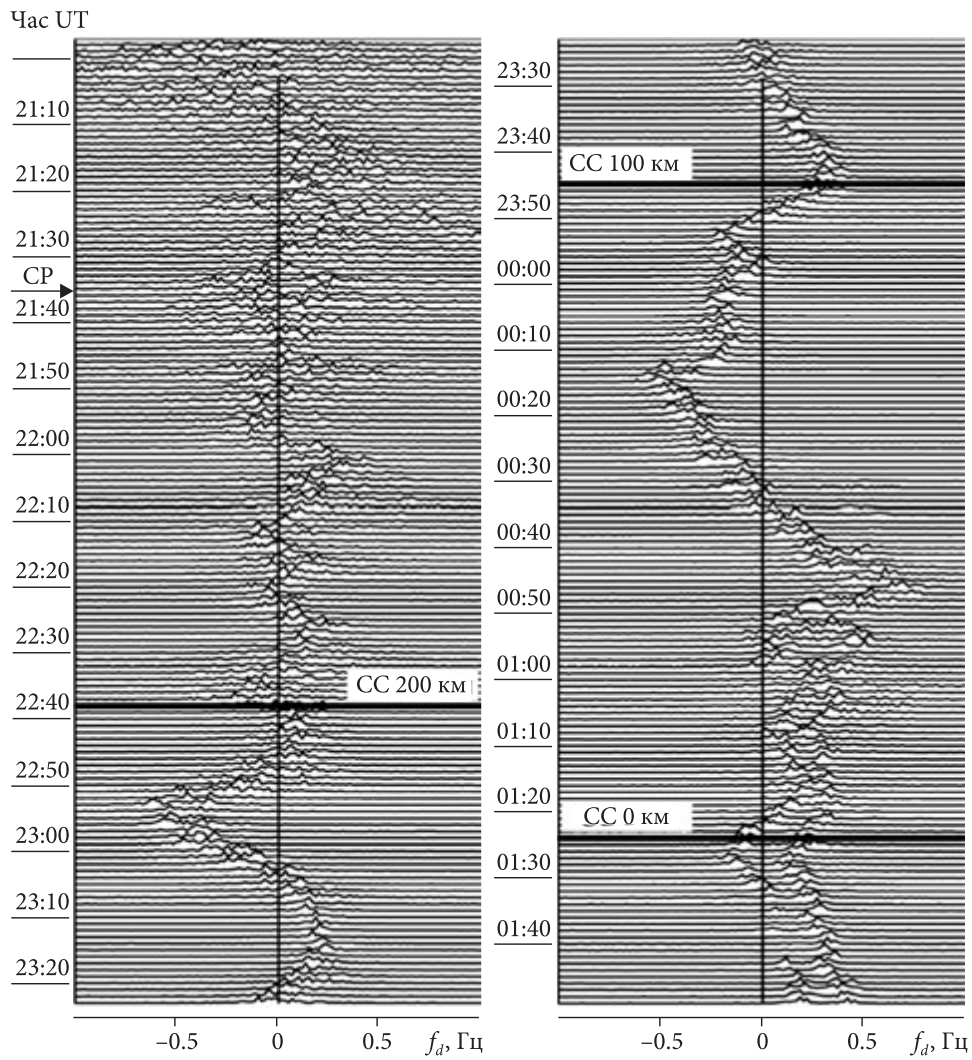
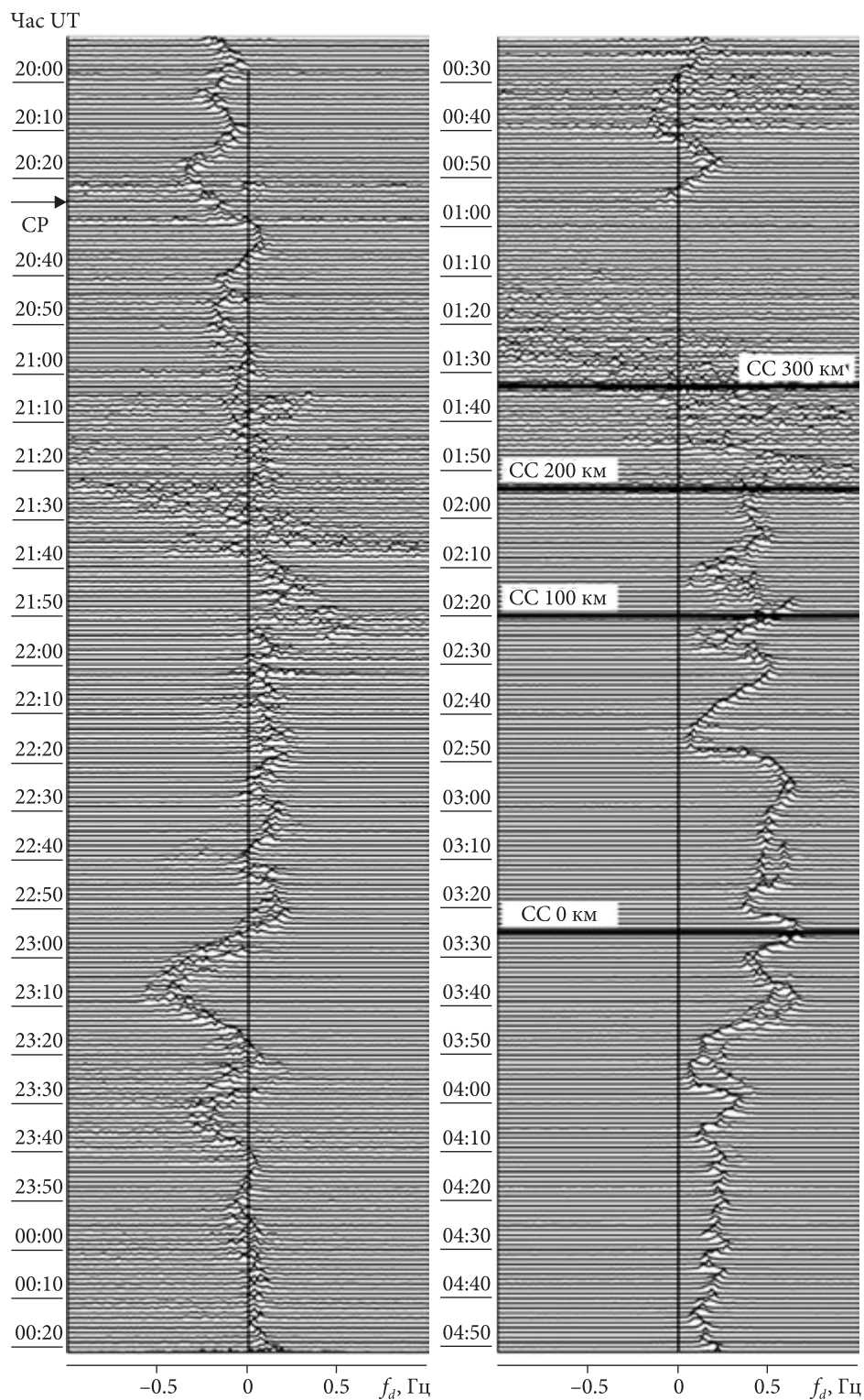


Рис. 9. Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 25 березня 2014 р. о 21:17:23 UT. Діапазон діючих висот 375...450 км

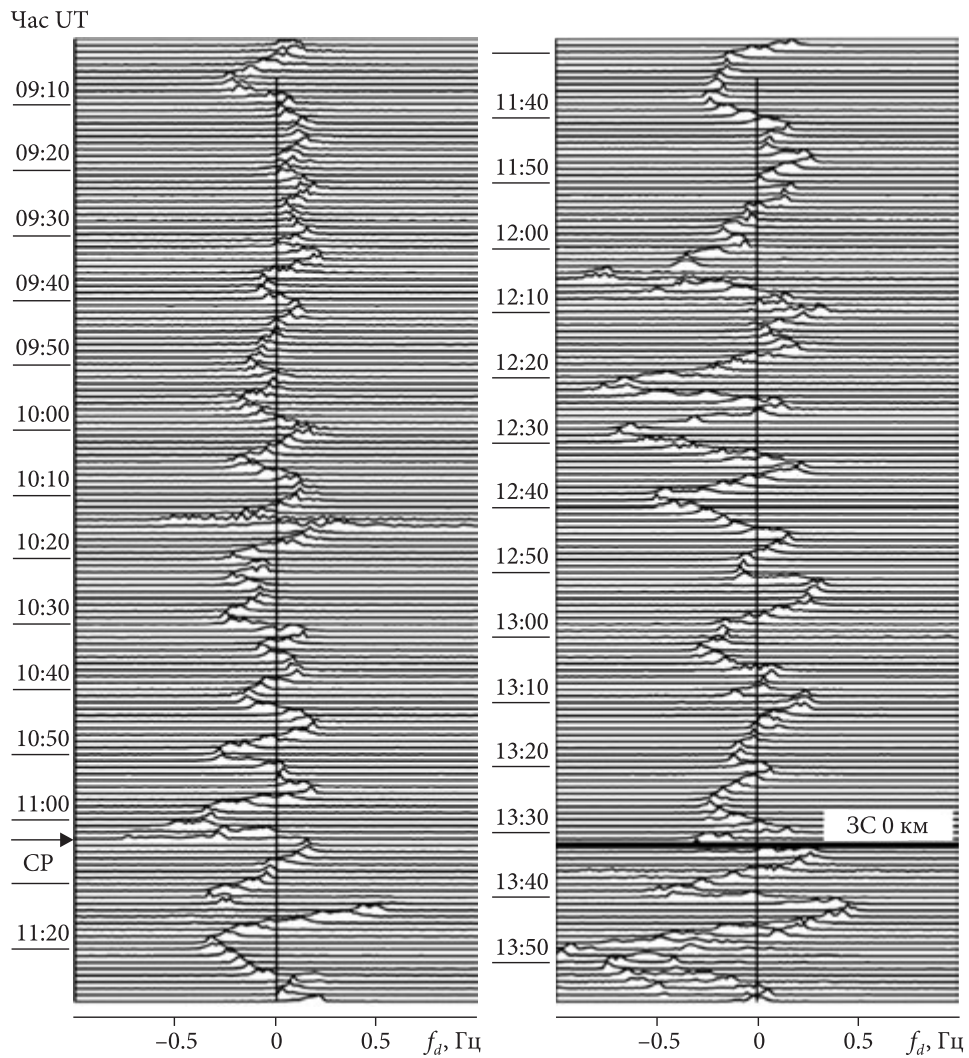


**Рис. 10.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 15 червня 2010 р. о 21:35:19 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км





**Рис. 11.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 25 вересня 2014 р. о 20:25 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



**Рис. 12.** Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у денний час 15 грудня 2015 р. об 11:03:09 UT. Діапазон діючих висот 225...300 км

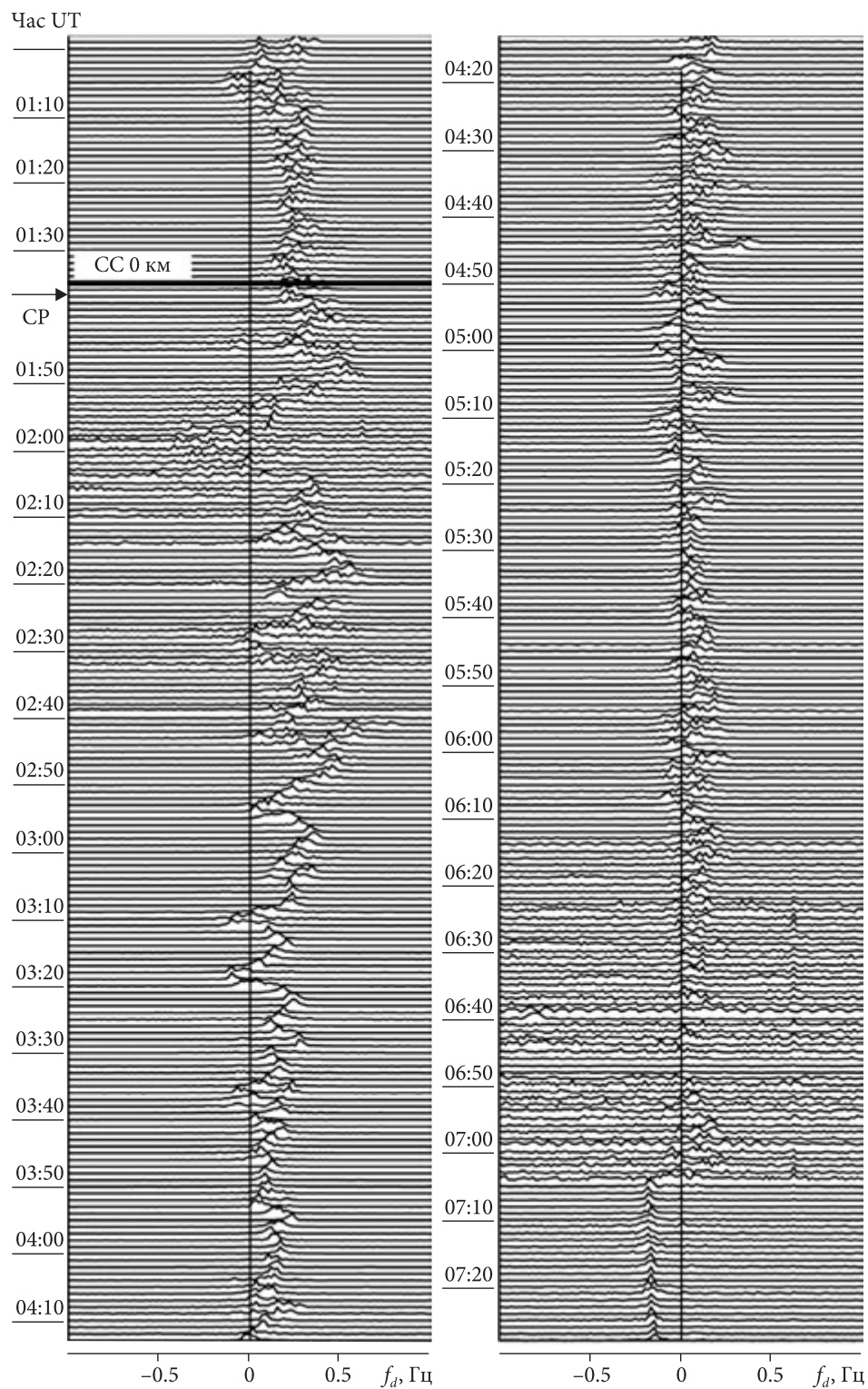


Рис. 13. Часові варіації доплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 7 липня 2016 р. о 01:36:41 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км

до 04:00 вони були більш-менш регулярними, після чого знову стали нерегулярними. Зміни характеру варіацій ДС спостерігалися через 29, 69 і 109 хв після старту ракети.

## ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо вплив магнітних бур, точніше пов'язаних з ними іоносферних бур, на ефекти, що викликаються стартами ракет в іоносфері.

Протягом 24-го циклу сонячної активності стартувала 81 ракета «Союз» і 53 ракети «Протон». Для ракети «Союз» старт супроводжувався у 20 випадках МБ, а у 23 випадках — магнітним збуренням з індексом  $K_{pmax} = 3$ , а для ракети «Протон» — відповідно у 13 і 12 випадках. Для інших дат індекс  $K_p$  змінювався від 0 до 2.

Зауважимо, що статистика МБ у 24-му циклі сонячної активності обговорюється у роботах [9, 11].

**Старт ракети «Протон» 9 жовтня 2019 р.** Вельми помірна МБ ( $K_{pmax} = 4-$ ) практично не вплинула на часові варіації ДС у денний час (див. рис. 1). Часам запізнення  $\Delta t = 22, 80, 137, 233$  і  $268$  хв відповідають горизонтальні позірні швидкості  $v'$ , які дорівнюють 2.35 км/с, 530, 300, 175 і 150 м/с. Швидкість  $v'$  оцінювалася із співвідношення

$$v' = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0},$$

де  $R$  — відстань між областю генерації збурень та місцем спостереження (для Байконура  $R \approx 2400$  км),  $\Delta t_0 \approx 5$  хв — час руху ракети до області генерації збурень. Найменші значення  $v'$ , близькі до 175 і 150 м/с, не пов'язані зі стартом ракети, а зумовлені дією на іоносферу вечірнього сонячного термінатора.

**Старт ракети «Протон» 3 червня 2010 р.** Помірна МБ ( $K_{pmax} = 5-$ ) практично не вплинула на часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц і в нічний час (див. рис. 2). Значенням часових затримок, що дорівнюють 27, 52, 75 і 148 хв, відповідають значення  $v' = 1.8$  км/с, а також 850, 570 і 280 м/с.

Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц дуже відрізнялися від упорядкованих варіацій ДС на частоті 3.2 МГц (див. рис. 3). Більшу частину часу спостерігався ефект «розсіпання» ДС. Часи

запізнення були близькі до 25, 50, 70 і 135 хв. Важливо, що ці часи були меншими, ніж на частоті 3.2 МГц. Їм відповідали швидкості близько 2 км/с, а також 890, 615 і 310 м/с, котрі перевищували швидкості, обчислені з вимірювань на частоті 3.2 МГц. Це підтверджує той факт, що збурення викликані саме стартами ракет і поширювалися вздовж іоносфери в напрямку обсерваторії. Справа в тому, що радіохвиля з більшою частотою відбивається вище, де швидкості поширення більші.

**Старт ракети «Протон» 29 вересня 2011 р.** Сильна МБ ( $K_{pmax} = 6-$ ) суттєво вплинула на ДС на частотах 3.2 і 4.2 МГц. Увесь час спостереження відмічався ефект «розсіпання» ДС (див. рис. 4). Варіації ДС були скоріше аперіодичними. Визначення часів запізнення дуже ускладнене. Можливо, що на частотах 3.2 і 4.2 МГц вони становили 10, 93 і 173 хв, а також 10, 84 і 170 хв. Їм відповідали позірні швидкості близько 8 км/с, 455 і 238 м/с, а також 8 км/с, 506 і 242 м/с. Співвідношення другої та третьої швидкостей дозволяє стверджувати, що вони пов'язані зі стартом ракети.

**Старт ракети «Протон» 8 грудня 2013 р.** На відміну від інших сезонів, узимку, точніше у грудні, значно посилюється хвильова активність (див. рис. 5, 12). До того ж у день старту ракети реєструвалася сильна МБ ( $K_{pmax} = 6$ ). Все це дуже ускладнило пошук реакції іоносфери на старт ракети. Приблизно після 13:30 додався вплив вечірнього сонячного термінатора (див. рис. 5). Можливі часи запізнення реакції іоносфери на старт космічного апарата склали 14, 48, 65, 107 і 130 хв, чому відповідають позірні швидкості 4.4 км/с, а також 930, 670, 390 і 320 м/с.

**Старт ракети «Протон» 9 липня 2012 р.** Дуже сильна МБ ( $K_{pmax} = 7-$ ) істотно вплинула на характер варіацій ДС (див. рис. 6). До того ж наклався вплив вечірнього сонячного термінатора. Усе це ускладнювало виявлення реакції іоносфери на старт ракети. Можливо, що ця реакція спостерігалася через 14, 45 і 79 хв після події, чому відповідають позірні швидкості 4.4 км/с, а також 1000 і 540 м/с.

**Старт ракети «Протон» 28 вересня 2017 р.** Вплив дуже сильної МБ був значним: весь час

спостереження відмічався ефект «розсіпання» ДС, квазіперіодичні варіації ДС досягали 0.5 Гц, а період — 25...30 хв (див. рис. 7). Хвильові збурення з такими параметрами викликаються МБ. При цьому на широтах порядку 70° генеруються атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ), котрі поширюються в екваторіальному напрямку. Визначення реакції іоносфери на старт космічного апарата дуже ускладнене. Зміна характеру варіацій мала місце через 48, 118 і 208 хв після старту ракети, чому відповідає позірна швидкість близько 930, 350 і 200 м/с. Мабуть, найменша з них не пов'язана зі стартом космічного апарата. Вплив ранкового сонячного термінатора почав проявлятися значно пізніше, приблизно після 01:00.

**Старт ракети «Союз» 2 квітня 2010 р.** Вельми помірні МБ ( $K_{pmax} = 4-$ ) практично не вплинула стан нічної іоносфери та часові варіації ДС (див. рис. 8). Після старту ракети у місці спостереження тривали ефекти, спричинені ранковим сонячним термінатором (див. рис. 8). Загалом часові варіації ДС були нерегулярними. Можливі часи запізнення реакції іоносфери на старт ракети становили 25, 117 і 161 хв. Їм відповідали значення  $v' = 2$  км/с, 360 і 255 м/с.

**Старт ракети «Союз» 25 березня 2014 р.** Незважаючи на те, що МБ належала до вельми помірних ( $K_{pmax} = 4-$ ), нічна іоносфера поблизу періоду весняного рівнодення була збуреною. Найчастіше спостерігався ефект «розсіпання» ДС (див. рис. 9). Причина аномально великих варіацій ДЗЧ (від  $-0.9$  до  $0.9$  Гц) криється у близькості частоти радіохвилі до критичної частоти шару  $F_2$  іоносфери в нічний і перехідний час доби. Усе це ускладнило виявлення реакції на старт космічного апарата. Якщо прийняти, що значення  $\Delta t$  дорівнювали 60, 103 і 182 хв, то отримуємо, що значення  $v'$  близькі до 730, 410 і 225 м/с.

**Старт ракети «Союз» 15 червня 2010 р.** Подія мала місце поблизу періоду літнього сонцестояння та періоду глибокого мінімуму сонячної активності. ДС зазнавали нерегулярних варіацій, які навряд чи могли бути зумовлені вельми помірною МБ ( $K_{pmax} = 4-$ ) (див. рис. 10). Можливі часи запізнення на частотах 3.2 і 4.2 МГц, які дорівнюють 24, 139 і 191 хв, збіглися. Це означає, що варіації ДС викликані іншим джерелом.

За  $\Delta t$ , яке дорівнювало 73 і 66 хв для частот 3.2 і 4.2 МГц відповідно маємо  $v' \approx 590$  і  $655$  м/с. Таке співвідношення швидкостей дозволяє стверджувати, що збурення зумовлене стартом ракети та переносилося за допомогою АГХ.

**Старт ракети «Союз» 25 вересня 2014 р.** Подія мала місце у нічний час поблизу періоду осіннього рівнодення. І хоча МБ відносилася до вельми помірних ( $K_{pmax} = 4-$ ), іоносфера, а отже і ДС, були сильно збуреними (див. рис. 11). Регулярний характер у поведінці ДС став спостерігатися після 02:20, але пов'язаний він не зі стартом ракети, а з рухом ранкового сонячного термінатора. Зміна характеру варіацій ДС на частотах 3.2 і 4.2 МГц наставала практично синхронно. Можливі значення  $\Delta t$  становили 18, 60, 90, 145 і 190 хв. Усі значення, крім  $\Delta t \approx 18$  хв, не пов'язані зі стартом ракети. За  $\Delta t = 18$  хв маємо  $v' \approx 3$  км/с. Така швидкість не належить до АГХ, а тому не залежить від висоти відбиття радіохвилі, а отже і від її частоти.

**Старт ракети «Союз» 15 грудня 2015 р.** Ефекти помірної МБ ( $K_{pmax} = 5-$ ) наклалися на ефекти, властиві іоносфері у грудні (див. рис. 12). Зміни характеру часових варіацій ДС відмічались приблизно через 11, 62, 103 і 150 хв після старту ракети, чому відповідають видимі швидкості приблизно 6.7 км/с, 700, 410 і 275 м/с.

**Старт ракети «Союз» 7 липня 2016 р.** Старт стався у перехідний час доби. На можливі ефекти від старту наклалися ефекти ранкового сонячного термінатора та помірної МБ ( $K_{pmax} = 5-$ ). Варіації ДС часто мали хаотичний характер, що ускладнило пошук реакції іоносфери на запуск космічного апарата. Можливо, вона спостерігалася з часом запізнення, що дорівнює 29, 69 і 109 хв. Тоді  $v'$  становить 1.67 км/с, 625 і 385 м/с.

Підведемо підсумки. Магнітна буря, сонячний термінатор та інші високоенергетичні джерела можуть значно маскувати іоносферні ефекти стартів і польотів великих ракет. У випадку наявності магнітних збурень з індексом  $K_{pmax} \leq 3$ , вельми помірних та помірних МБ найчастіше вдається впевнено виділити реакцію іоносфери на запуски космічних апаратів. При збільшенні індексу  $K_{pmax}$  це зробити все складніше. Надійність визначення реакції залежить не тільки від інтенсивності МБ і

ІБ, а й від сезону року, часу доби, типу ракети, наявності інших джерел збурення.

При стартах ракет спостерігалося декілька груп горизонтальних позірних швидкостей: 1.7...3 км/с і більше, 700...1000, 300...700 і 150...260 м/с. Перша група, мабуть, має швидкість повільних МГД-хвиль [4]. Вона визначається не завжди. Швидкість 700...1000 м/с властива ударним хвилям щільності в атмосфері [5, 13], швидкість 300...700 м/с типова для АГХ техногенного походження [5, 13], а найменша швидкість властива АГХ природного походження [1]. Подібні групи швидкостей спостерігалися нами і раніше [5, 13].

Під час негативних іоносферних бур, як відомо, концентрація електронів  $N$  у  $F$ -області іоносфери може зменшуватися до 10 разів. При цьому радіохвилі з частотою понад 3 МГц перестають відбиватися від іоносфери. Для дослідження ефектів стартів ракет слід використовувати радіохвилі з частотою 1.5...2 МГц. Під час позитивних іоносферних бур значення  $N$  у  $F$ -області іоносфери, навпаки, збільшуються до 2...5 разів. Для зондування іоносфери ефективними є радіохвилі з частотою 3...6 МГц. При цьому менша частота відбивається від  $E$ -області, а більша — від  $F$ -області іоносфери.

Для охоплення всіх можливих геофізичних станів іоносфери рекомендується одночасно використовувати низку частот у діапазоні від 1.5...2 до 4...6 МГц.

## ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Встановлено, що виявлення реакції іоносфери на віддалений на відстань порядку 2000 км старт і політ великої ракети на фоні геокосмічної бурі доплерівським методом зазвичай можливе при індексі  $K_{pmax} \leq 5$ , а при більших його значеннях воно дуже ускладнене або взагалі неможливе.

2. Продемонстровано, що у ряді випадків визначення реакції виявляється ускладненим навіть при значенні індексу  $K_{pmax} = 4$ .

3. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети доплерівський радар повинен одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5...2 до 4...6 МГц.

4. Підтверджено реєстрацію декількох груп горизонтальних позірних швидкостей поширення збурень: 1.7...3 км/с і більше, 700...1000, 300...700, 150...260 м/с.

*Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проект 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 та 0122U001476).*

## ЛІТЕРАТУРА

1. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. Москва: Мир, 1978. 532 с.
2. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полета ракеты «Протон»: результаты вертикального зондирования. *Космична наука і технологія*. 2010. **16**, № 3. С. 15—21. <https://doi.org/10.15407/knit2010.03.015>
3. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты «Союз» в спокойных и магнитовозмущенных условиях. *Космична наука і технологія*. 2010. **16**, № 3. С. 22—31. <https://doi.org/10.15407/knit2010.03.022>
4. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме*. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 135 с.
5. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
6. Черногор Л. Ф. *О возможном воздействии запусков ракетно-космической техники на магнитное поле Земли. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую природную среду*. Под общей ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, М. В. Сильникова. Москва: ГЕОС, 2016. С. 483—520.
7. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
8. Черногор Л. Ф., Живолуп Т. Г. Сравнительный анализ ионосферных эффектов в течение полетов ракеты «Протон» при различных состояниях космической погоды. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011. **16**, № 4. С. 394—403.

9. Черногор Л. Ф. Статистичні характеристики геомагнітних бур у 24-му циклі сонячної активності. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. **37**, № 4. С. 49—59. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.049>.
10. Черногор Л. Ф. Фізика геоскопічних бур. *Космічна наука і технологія.* 2021. **27**, № 1 (128). С. 3—77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>.
11. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю., Луо У. Статистика геомагнітних бур протягом циклу сонячної активності (2009—2020 рр.). *Вісник Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка.* 2020. **33**. С. 69—77. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06>.
12. *Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: Справочное пособие.* Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. Москва: Анкил, 2000. 640 с.
13. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment.* Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 542 с.
14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. *Радиофизика и радиоастрон.* 1998. **3**, № 2. С. 181—190.
15. Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy.* 1999. **39**, № 1. P. 69—75.

## REFERENCES

1. Gossard E. E., Hook W. H. (1975). *Waves in the Atmosphere.* Amsterdam: Elsevier.
2. Zhivolup T. G., Chernogor L. F. (2010). Ionospheric effects during rocket «Proton» flight: results of vertical sounding. *Space Science and Technology*, **16**, № 3, 15—21. <https://doi.org/10.15407/knit2010.03.015>
3. Zhivolup T. G., Chernogor L. F. (2010). Ionospheric effects during flights of the rocket «Soyuz» under magnetically quiet and magnetically disturbed conditions. *Space Science and Technology*, **16**, № 3, 22—31. <https://doi.org/10.15407/knit2010.03.022>
4. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. (1982). *The physics of slow MHD waves in the ionospheric plasma.* Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
5. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Engine Burn: Monograph.* Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian]
6. Chernogor L. F. (2016). Possibility Action of Rocket and Space Engineering Launches on Earth's Magnetic Field. *Rocket's environmental impact.* Eds V. V. Adushkin, S. I. Kozlov, M. V. Sil'nikov. Moscow: GEOS, 483—520 [in Russian].
7. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geospace storms: Monograph.* Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine [in Russian]
8. Chernogor L. F., Zhivolup T. G. (2012). Comparative analysis of ionospheric effects as observed during «Proton» rocket flights under different space weather conditions. *Radio Phys. Radio Astron.*, **3** (2), 139—148.
9. 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. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.049>.
10. Chernogor L. F. (2021). Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*, **27**, № 1 (128), 3—77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>.
11. Chornogor 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. Ser. Radio Phys. and Electronics*, **33**, 69—77. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>.
12. *The environmental problems and the risks of rocket-space technology impact on the natural environment: Handbook.* (2000). Eds V. V. Adushkin, S. I. Kozlov, A. V. Petrov. Moscow: Ankil Publ. [in Russian].
13. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2013). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment.* Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group.
14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. (1998). Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. *Radio Phys. Radio Astron.*, **3** (2), 181—190.
15. Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. (1999). Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy*, **39** (1), 69—75.

Стаття надійшла до редакції 29.03.2022  
 Після доопрацювання 29.03.2022  
 Прийнято до друку 26.04.2022

Received 29.03.2022  
 Revised 29.03.2022  
 Accepted 26.04.2022

Y. Luo, Postgraduate

ORCID ID: 0000-0002-3376-5814

E-mail: yiyangluo@163.com

L. F. Chernogor, Head of the Department, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

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

Y. H. Zhdanko, Junior Researcher, Postgraduate

ORCID ID: 0000-0002-4612-4194

E-mail: eugenezhd@gmail.com

V. N. Karazin National University of Kharkiv

4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

## IONOSPHERIC EFFECTS FROM ROCKET LAUNCHES AGAINST THE BACKGROUND OF GEOSPACE STORMS

Ionospheric effects accompanying launches and maneuvering system thruster firings of large rockets have been studied for about 60 years. Fairly complete and adequate models of generation and propagation of disturbances, which are caused by launches and maneuvering system thruster firings of large rockets in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere (EAIM) system, are absent at present. It turns out a number of physical effects during ionospheric storms and rocket launches are similar. Therefore, the presence of ionospheric storm significantly complicates the search for the ionospheric response to the spacecraft launches.

The aim of this study is to describe the results of observation of the ionospheric processes that accompanied rocket launches and maneuvering system thruster firings against the background of ionospheric storms. To analyze the measurements, observational data of the state of the ionosphere before, at the time, and after *Soyuz* and *Proton* rocket launches from the Baikonur cosmodrome (the Republic of Kazakhstan) were used. Observations were made at the Radiophysical Observatory of V. N. Karazin Kharkiv National University (near Kharkiv city, Ukraine). The Doppler vertical sounding radar was used for the measurements. Observations were made during solar cycle 24 (2009–2021). The number of the *Soyuz* rocket launches is 81, and 53 launches of the *Proton* rocket.

Identification of the ionospheric response to the launch and maneuvering system thruster firings of a large rocket 2000 km away from the observation site against the background of a geospace storm by the Doppler method is usually possible at  $K_{pmax} \leq 5$ , and at its larger values is very complicated or even impossible. In a number of cases, even though  $K_{pmax} = 4$  the determination of the ionospheric response is complicated. To increase the detection reliability of the response to the launch and maneuvering system thruster firings of the rocket, the Doppler radar has to operate on a number of frequencies in the frequency range from 1.5...2 to 4...6 MHz. The existence of several groups of horizontal apparent speeds of disturbance propagation is confirmed: 1.7...3 km and more, 700...1000, 300...700, 150...260 m/s.

**Keywords:** rocket launch, ionospheric effect, magnetic storm, ionospheric storm, aperiodic disturbance, quasiperiodic disturbance, time delay, apparent speed.