

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.249>
УДК 551.590.24; 551.524.3

Л.Ф. Чорногор, К.П. Гармаш,
Q. Guo, Y. Luo, В.Т. Розуменко, Y. Zheng

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

ОСОБЛИВОСТІ ВАРІАЦІЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВЧ-РАДІОХВИЛЬ В ІОНОСФЕРІ ВПРОДОВЖ СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 21 ЧЕРВНЯ 2020 Р. НАД КИТАЄМ

Предмет і мета роботи. Дослідження впливу кожного нового сонячного затемнення (СЗ) на характеристики радіохвиль є актуальним завданням. Мета цієї роботи — виклад результатів спостережень за варіаціями доплерівських спектрів (ДС), доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) та амплітуд відбитого сигналу (АВС), що мали місце впродовж СЗ 21 червня 2020 р. над Китаєм.

Методи та методологія. Для спостережень за варіаціями характеристик радіохвиль ВЧ-діапазону використовувався багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний комплекс Харбінського інженерного університету (КНР). Аналізу підлягають часові варіації ДС, ДЗЧ основної моди сигналу та АВС. Далі варіації ДЗЧ піддавалися системному спектральному аналізу, що використовує спільно віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення з материнською функцією Морле.

Результати. Сонячне затемнення супроводжувалося дифузністю ДС унаслідок посилення багатопроменевості. Часові варіації ДЗЧ були двополярними й асиметричними. Екстремальні значення ДЗЧ змінювалися від -11 до -40 мГц, а також від 22 до 56 мГц. Тривалість процесів із від'ємним значенням ДЗЧ варіювала від 50 до 80 хв, тривалість процесів із додатним значенням ДЗЧ — від 30 до 80 хв. На всіх радіотрасах поширення було багатострибковим (від двох до п'яти стрибків). Довжина одного стрибка змінювалася від 360 до 560 км. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ становила $20...50$ мГц для періоду $4...5$ хв та $40...100$ мГц для періоду $8...18$ хв. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів змінювалася в межах $0.3...6.2$ % для періоду $4...5$ хв та в межах $1.1...21.7$ % для періоду $8...18$ хв. Відносне зменшення концентрації електронів на різних радіотрасах варіювало від $-(12...16)$ до $-(20...26)$ %.

Висновки. Вивчено особливості варіацій характеристик ВЧ-радіохвиль в іоносфері впродовж СЗ, яке відбулося 21 червня 2020 р. над Китаєм.

Ключові слова: сонячне затемнення, ВЧ-радіохвиля, іоносфера, похиле радіозондування, доплерівський спектр, доплерівське зміщення частоти, амплітуда відбитого сигналу.

Цитування: Чорногор Л.Ф., Гармаш К.П., Guo Q., Luo Y., Розуменко В.Т., Zheng Y. Особливості варіацій характеристик ВЧ-радіохвиль в іоносфері впродовж сонячного затемнення 21 червня 2020 р. над Китаєм. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 4. С. 249–267. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.249>

Citation: Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Guo, Q., Luo, Y., Rozumenko, V.T., Zheng Y., 2022. Characteristic features of variations in HF radio wave parameters in the ionosphere during the course of the Solar eclipse of June 21, 2020 over the People's Republic of China. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(4), pp. 249–267. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.249>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Сонячне затемнення (СЗ) викликає низку нестаціонарних процесів у системі «Земля—атмосфера—іоносфера—магнітосфера» [1]. При цьому змінюються параметри всіх підсистем і їхніх геофізичних полів. В іоносфері зменшується концентрація електронів, температура електронів та іонів, активізується перенесення плазми та висипання частинок з магнітосфери, генеруються нестійкості у плазмі й атмосфері, а також хвильові процеси різної фізичної природи [1].

У процесі СЗ суттєво змінюються параметри атмосферно-іоносферного радіоканалу. Ці зміни неминуче впливають на характеристики радіохвиль практично всіх діапазонів. Найбільше збуруються характеристики радіохвиль ДНЧ-, НЧ-, СЧ- і ВЧ-діапазонів.

Дослідженню збурень іоносфери, що супроводжують СЗ, присвячено сотні робіт. Ефекти СЗ 21 червня 2020 р. описані у роботах [2–15]. Більшість авторів для спостережень використовували GPS-технології [9, 11, 12, 15].

Вплив СЗ на характеристики радіохвиль вивчено помітно менше. Цьому питанню присвячені, наприклад, роботи [16–21]. Вплив СЗ на поширення радіохвиль різних діапазонів істотно залежить від фази циклу сонячної активності, пори року, географічних координат, стану атмосферно-космічної погоди тощо. Дослідження впливу кожного нового СЗ на характеристики радіохвиль є актуальним завданням.

Метою цієї роботи є виклад результатів спостережень за варіаціями доплерівських спектрів (ДС), доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) та амплітуд відбитого сигналу (АВС), що мали місце впродовж СЗ 21 червня 2020 р. над Китаєм.

1. Загальні відомості про сонячне затемнення

Сонячне затемнення, що відбулося 21 червня 2020 р. 137-го саросу, було кільцеподібним. Максимальна фаза $M_{\max} = 0.9940$, яка почалася о 04:47:45 UT (05:47:45 LT), спостерігалася на півночі Індії у штаті Уттаракханд і тривала 38 с. Сонячне затемнення спостерігалось також у східній частині Африки, у південній і східній Азії (рис. 1). Ширина тіні становила 21.2 км. Максимальна фаза СЗ відмічалася о 06:39:59 UT

поблизу кордону Індії та Китаю у точці з координатами $30^{\circ}30'$ пн. ш. і $79^{\circ}42'$ сх. д. Далі смуга тіні пройшла Китай і Тихий океан. Кільцеподібна фаза завершилася о 08:32:17 у точці з координатами 19° пн. ш., 149° сх. д.

Часткове СЗ спостерігалось в 111 країнах, на території майже всієї Африки, на південному сході Європи, більшій частині Азії (за винятком північної частини Російської Федерації), на пів-

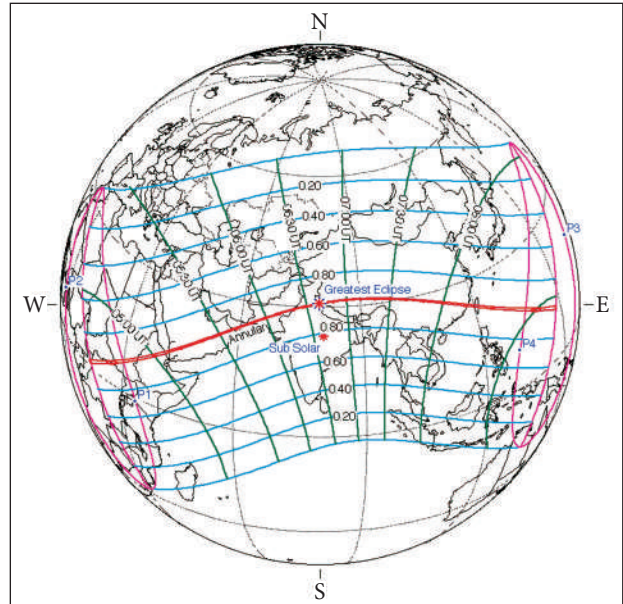


Рис. 1. Траєкторія місячної тіні та області, де фаза СЗ змінюється від 0 до максимального значення

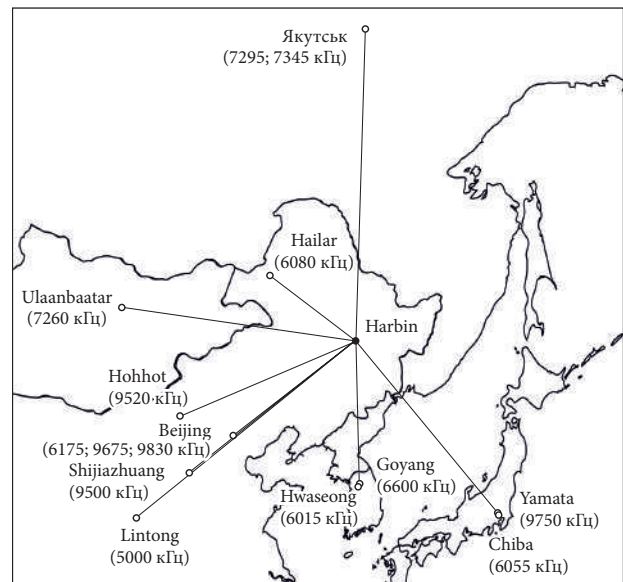


Рис. 2. Схема радіотрас, які використовувалися для спостереження за СЗ

ночі Австралії, а також у північній частині Індійського та західній частині Тихого океанів.

2. Засоби та методи

Для спостережень за варіаціями характеристик радіохвиль ВЧ-діапазону використовувався багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний комплекс Харбінського інженерно-

го університету (КНР), який описаний у роботах [22–24]. Схему розташування радіотрас показано на рис. 2. Відомості про використані радіотраси наведено в табл. 1. Довжина радіотрас змінювалась у межах ~1000...2000 км.

Основні відомості про параметри СЗ на висоті 100 км у середніх точках радіотрас представлені в табл. 2. За даними цієї таблиці, фаза

Таблиця 1. Основні відомості про радіотраси (за матеріалами <https://fmscan.org/index.php>)

Частота, кГц	Координати передавача, широта/довгота	Розташування (країна)	Відстань до Харбіна, км	Координати середньої точки траси, широта/довгота
5000	34.95N/109.56E	Lintong/Pucheng (China)	1875	40.37N/118.12E
6015	37.21N/126.78E	Hwaseong (Korea)	950	41.50N/126.73E
6055	35.47N/140.21E	Chiba/Nagara (Japan)	1610	40.63N/133.45E
6080	49.18N/119.72E	Hailar/Nanmen (China)	645	47.48N/123.2E
6175	39.75N/116.81E	Beijing (China)	1050	42.77N/121.75E
6600	37.60N/126.85E	Goyang (Korea)	910	41.69N/126.77E
7260	47.80N/107.17E	Ulaanbaatar/Khonkhor (Mongolia)	1496	46.79N/116.93E
7295	62.24N/129.81E	Yakutsk (Russia)	1845	54.01N/128.25E
7345	62.24N/129.81E	Yakutsk (Russia)	1845	54.01N/128.25E
9500	38.47N/114.13E	Shijiazhuang (China)	1310	42.13N/120.41E
9520	40.72N/111.55E	Hohhot (China)	1340	43.25N/119.12E
9675	39.75N/116.81E	Beijing (China)	1050	42.77N/121.75E
9750	36.17N/139.82E	Yamata (Japan)	1570	40.98N/133.25E
9830	39.75N/116.81E	Beijing (China)	1050	42.77N/121.75E

Таблиця 2. Основні відомості про параметри сонячного затемнення у середніх точках, які використовувались для спостереження трас на висоті 100 км (за матеріалами <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>)

Радіотраса	Фаза затемнення	Площа затемнення диска Сонця	Початок затемнення		Момент максимальної фази			Закінчення затемнення	
			Час, UT	Висота Сонця, град.	Час, UT	Висота Сонця, град.	Азимут Сонця, град.	Час, UT	Висота Сонця, град.
Lintong/Pucheng to Harbin	0.551	0.446	06:38:28	54	07:52:46	41	268	08:59:00	28
Hwaseong to Harbin	0.445	0.330	06:54:12	45	07:58:16	33	273	08:56:12	22
Chiba/Nagara to Harbin	0.403	0.286	07:04:35	38	08:03:03	27	279	08:56:20	17
Hailar/Nanmen to Harbin	0.330	0.215	06:49:54	47	07:47:22	37	265	08:40:31	28
Beijing to Harbin	0.458	0.344	06:45:42	50	07:52:49	38	268	08:53:29	27
Goyang to Harbin	0.440	0.325	06:54:17	45	07:58:01	33	273	08:55:43	22
Ulaanbaatar/Khonkhor to Harbin	0.393	0.277	06:38:28	53	07:43:01	42	259	08:42:19	32
Yakutsk to Harbin	0.143	0.063	07:03:33	40	07:41:07	34	263	08:17:06	29
Shijiazhuang to Harbin	0.485	0.374	06:43:07	51	07:52:33	39	268	08:55:03	27
Hohhot to Harbin	0.467	0.354	06:40:58	52	07:49:51	40	265	08:52:08	29
Yamata to Harbin	0.396	0.280	07:04:18	38	08:02:29	27	278	08:55:34	18

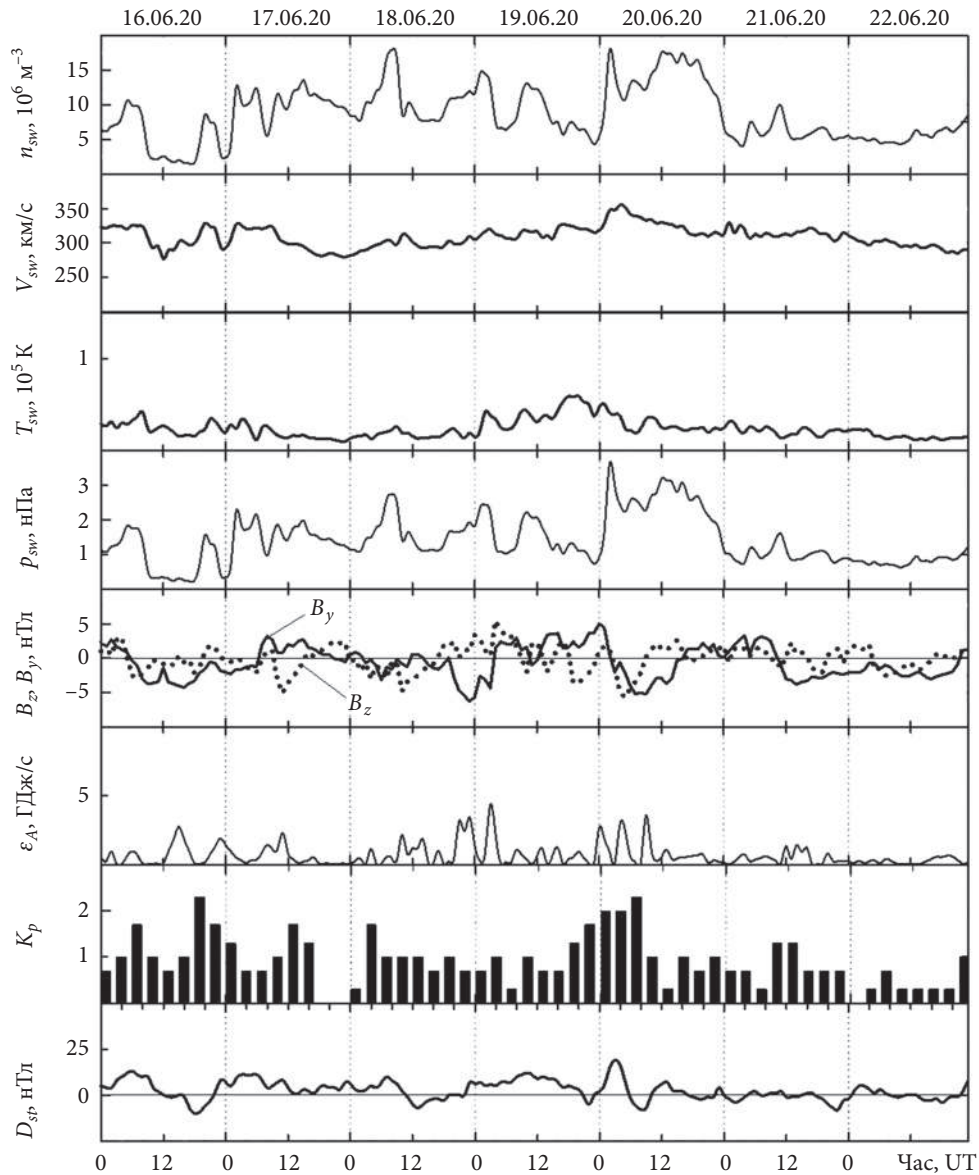


Рис. 3. Часові варіації параметрів сонячного вітру: вимірної концентрації частинок n_{sw} ; температури T_{sw} ; радіальної швидкості V_{sw} ; розрахованого динамічного тиску p_{sw} ; вимірених компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу; K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 16–22 червня 2022 р.

$S3 M_{max} \approx 0.14...0.55$, а площа затінення диска $A_{max} \approx 0.06...0.45$. Для подальшого аналізу використовувалися лише шість радіотрас, для яких $M_{max} \approx 0.40...0.55$ ($A_{max} \approx 0.29...0.45$) та був прийнятним режим випромінювання.

Вимірювання на комплексі ведуться безперервно. Частота оцифрування доплерівських варіацій відбитого від іоносфери сигналу становить 50 відліків за секунду. Оцінювання ДС проводиться на інтервалі часу 20 с. При цьому ви-

користується авторегресійний алгоритм [25], який забезпечує роздільну здатність за частотою 0.02 Гц. Роздільна здатність за часом становить 7.5 с.

Аналізу підлягали часові варіації ДС, ДЗЧ $f_D(t)$ основної моди сигналу та АВС. За залежністю $f_D(t)$ на інтервалі часу 30 хв обчислювався тренд $\bar{f}_D(t)$ і флуктуації $\delta f_D(t) = f_D(t) - \bar{f}_D(t)$.

Далі варіації $\delta f_D(t)$ піддавалися системному спектральному аналізу (ССА), що використо-

вує спільно віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворення (ВП) з материнською функцією Морле [26].

3. Стан космічної погоди

Часові варіації параметрів сонячного вітру, компонент міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітної активності наведено на рис. 3. З рис. 3 можна бачити, що концентрація частинок у сонячному вітрі з 16 по 22 червня 2020 р. флюктувала в межах $(1.5...18.0) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Швидкість, температура й тиск частинок змінювалися відповідно в межах 277...355 км/с, $10^4...5.9 \cdot 10^4 \text{ К}$ і 0.2...3.6 нПа. Значення V_y - та V_z -компонент міжпланетного магнітного поля флюктували в межах -6.3...5.4 нТл. Функція Акасофу ϵ_A не перевищувала 4.3 ГДж/с. Індекси K_p і D_{st} змінювалися в межах 0...2.3 і -10...19 нТл.

З цього випливає, що стан космічної погоди був сприятливим для дослідження ефектів С3.

4. Результати спостережень

4.1. Часові варіації доплерівських спектрів та амплітуди відбитого сигналу

Часові варіації ДС для різних радіотрас у день С3 та у контрольні дні 19 та 22 червня 2020 р. наведено на рис. 4—9.

Радіотраса Lintong/Pucheng — Harbin. Як видно з рис. 4, у контрольні дні тренд ДЗЧ $f_D \approx 0$ Гц. Значення f_D флюктували у межах $\pm(30...50)$ мГц. Амплітуда $A(t)$ збільшувалася від $-(63...65)$ дБВ до -57 дБВ. У день С3 тренд ДЗЧ в інтервалі часу 07:00—08:00 змінювався від 0 до -16.7 мГц, а потім від -16.7 до 0 Гц. З 08:10 до 09:10 тренд ДЗЧ збільшувався від 0 до 55.6 мГц, а потім зменшувався до 0 Гц. В інтервалі часу 07:45—08:50 збільшувалися флюктуації АВС. Величина квазіперіоду $T \approx 2.5$ хв.

Радіотраса Hwaseong — Harbin. У контрольні дні $f_D \approx 0$ Гц (див. рис. 5). Рівень флюктуацій рідко перевищував 30...40 мГц. З 06:00 до 10:00 АВС, слабо флюктууючи, збільшувалася від -55 до -45 дБВ. 21 червня 2020 р. з 06:45 до 07:35 тренд ДЗЧ змінювався від 0 до -16 мГц, а потім від -16 мГц до 0 Гц. В інтервалі часу 08:00—09:00 тренд ДЗЧ збільшувався від 0 до 40 мГц, а потім зменшувався до 0 Гц. Приблизно з 07:10 до 08:40

зростав рівень флюктуацій АВС, у флюктуаціях спостерігався квазіперіодичний процес з $T \approx 5$ хв.

Радіотраса Chiba/Nagara — Harbin. На рис. 6 показано, що в контрольні дні $f_D \approx 0$ Гц, рівень флюктуацій f_D досягав 100 мГц. 19 червня 2020 р. в окремі моменти часу, крім основної моди ДЗЧ, спостерігалися і слабкі моди із зсувом ДЗЧ на 0.3...0.5 Гц. 22 червня 2020 р. у спектрі, крім основної моди, відмічалася мода із зсувом на 0.2...0.5 Гц. У контрольні дні в інтервалі часу 07:00—09:00 АВС збільшувалася від -70 до -50 дБВ. У день С3 спостерігалася більш швидке зростання АВС, після 08:15 спостерігалася її падіння, а потім зростання до 09:10. За ним послідували також немонотонні варіації АВС. Упродовж С3 варіації амплітуди досягали 12...15 дБВ, а в контрольні дні в цьому ж інтервалі часу вони не перевищували 5...7 дБВ. 21 червня 2020 р., на відміну від контрольних днів, з 07:15 до 08:40 спостерігалася суттєве збільшення багатомодовості. Доплерівський спектр розширювався на 0.5 Гц та більше (див. рис. 6).

Радіотраса Shijiazhuang — Harbin. Як видно з рис. 7, ДС 19, 21 і 22 червня були переважно одномодовими. Доплерівське зміщення частоти варіювалось у межах 50...100 мГц. Зміни ДЗЧ були, найчастіше, квазіперіодичними з $T \approx 5$ хв. Поведінка тренда ДЗЧ у день С3 відрізнялася від поведінки у контрольні дні: з 06:45 до 07:50 $f_D < 0$, а з 07:50 до 09:00 $f_D > 0$. Немонотонними були і варіації АВС 21 червня 2020 р. з 07:00 до 09:00, амплітуда змін була близько 3 дБВ.

Радіотраса Hohhot — Harbin. З рис. 8 можна бачити, що ДС у день С3 та контрольні дні були практично одномодовими. Варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з $T \approx 5...6$ хв. У день С3 варіації f_D були такими: з 06:50 до 07:50 $f_D < 0$, а потім з 07:50 до 09:00 $f_D > 0$. Зміни АВС були також немонотонними, амплітуда варіацій в інтервалі часу 07:30—08:50 досягала 4...5 дБВ.

Радіотраса Beijing — Harbin. На цій радіотрасі ДС також були практично одномодовими (див. рис. 9). Доплерівське зміщення частоти флюктувало з квазіперіодом $T \approx 5...7$ хв. Варіації АВС у контрольні дні у середньому були монотонними. У день С3 монотонність порушувалася в інтервалі часу 07:30—09:15. Амплітуда коливань АВС досягала 5 дБВ. 21 червня 2020 р. з 06:30 до 07:50

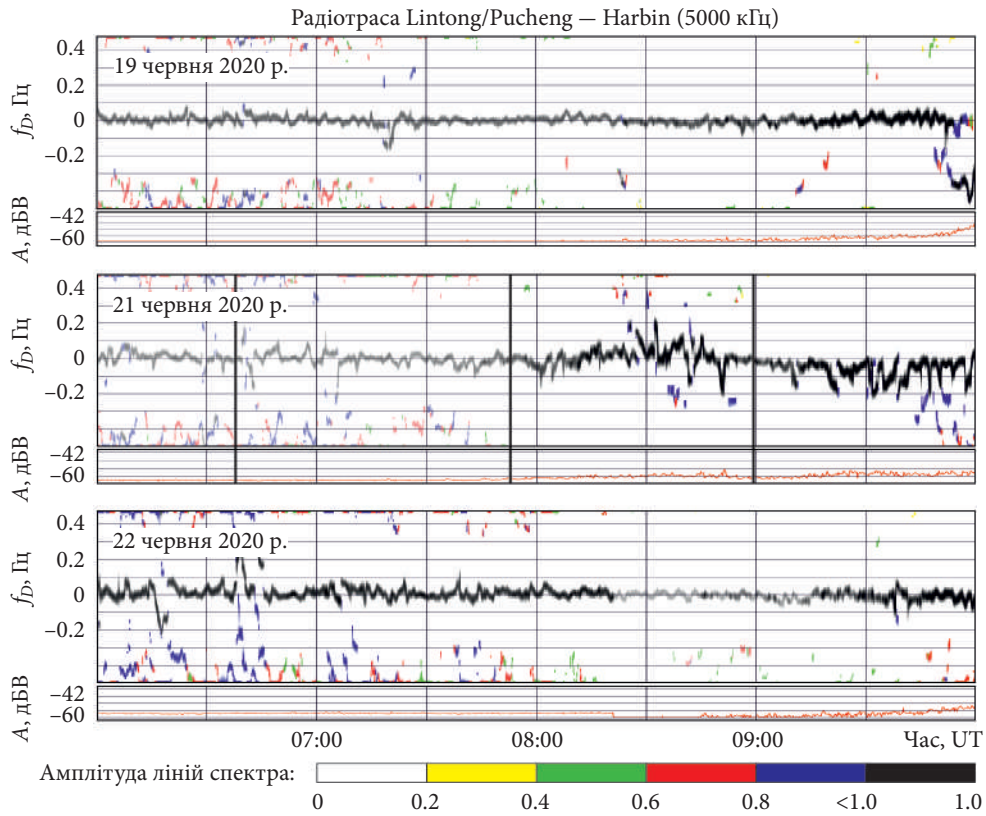


Рис. 4. Часові варіації ДС на радіотрасі Lintong/Pucheng – Harbin у день СЗ та в контрольні дні. Вертикальні лінії тут і надалі вказують на початок, максимальну фазу та кінець СЗ

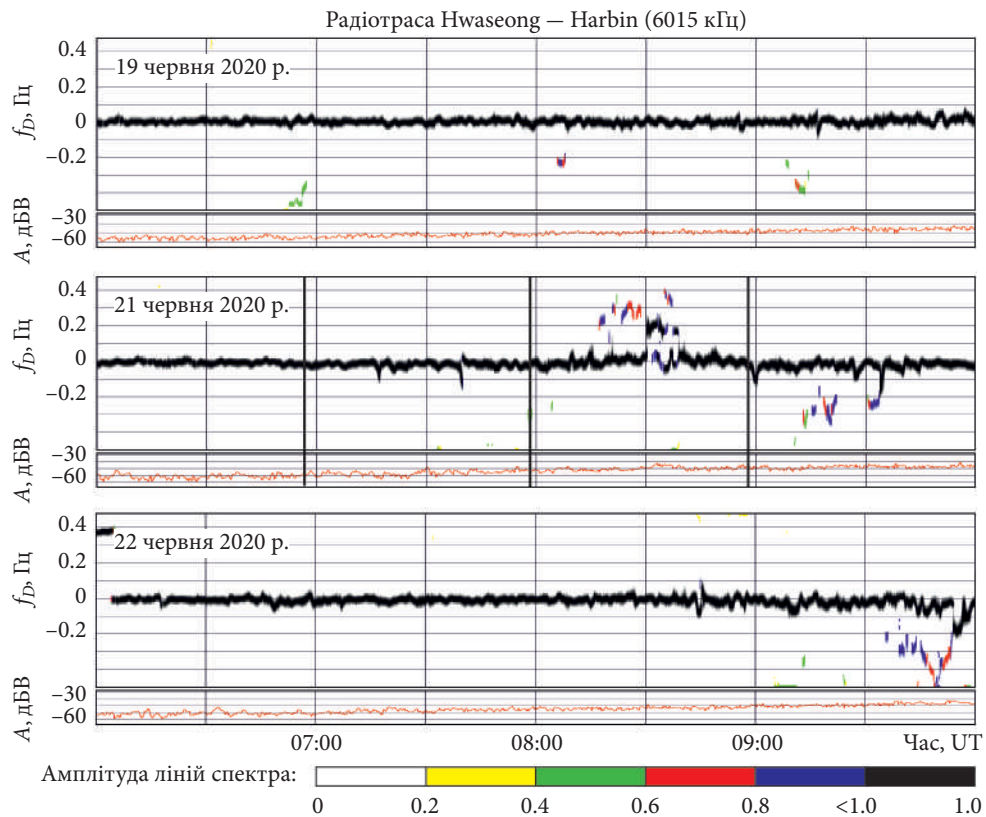


Рис. 5. Те, що на рис. 4, для радіотраси Hwaseong – Harbin

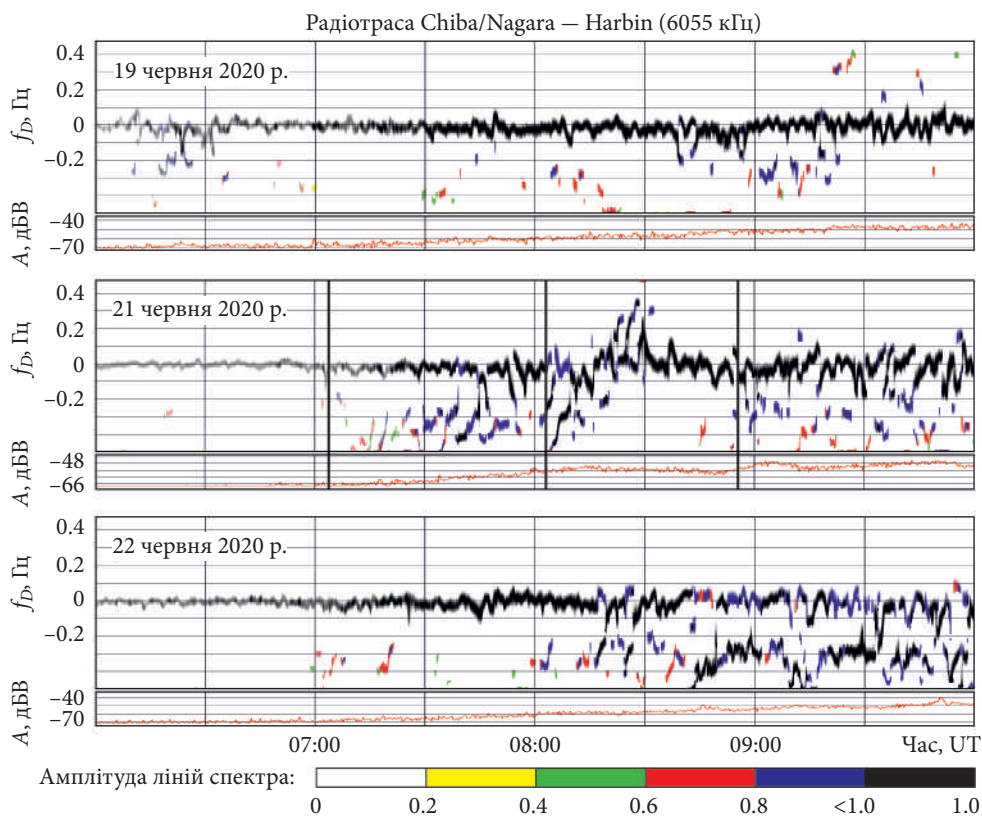


Рис. 6. Те, що на рис. 4, для радіотраси Chiba/Nagara – Harbin

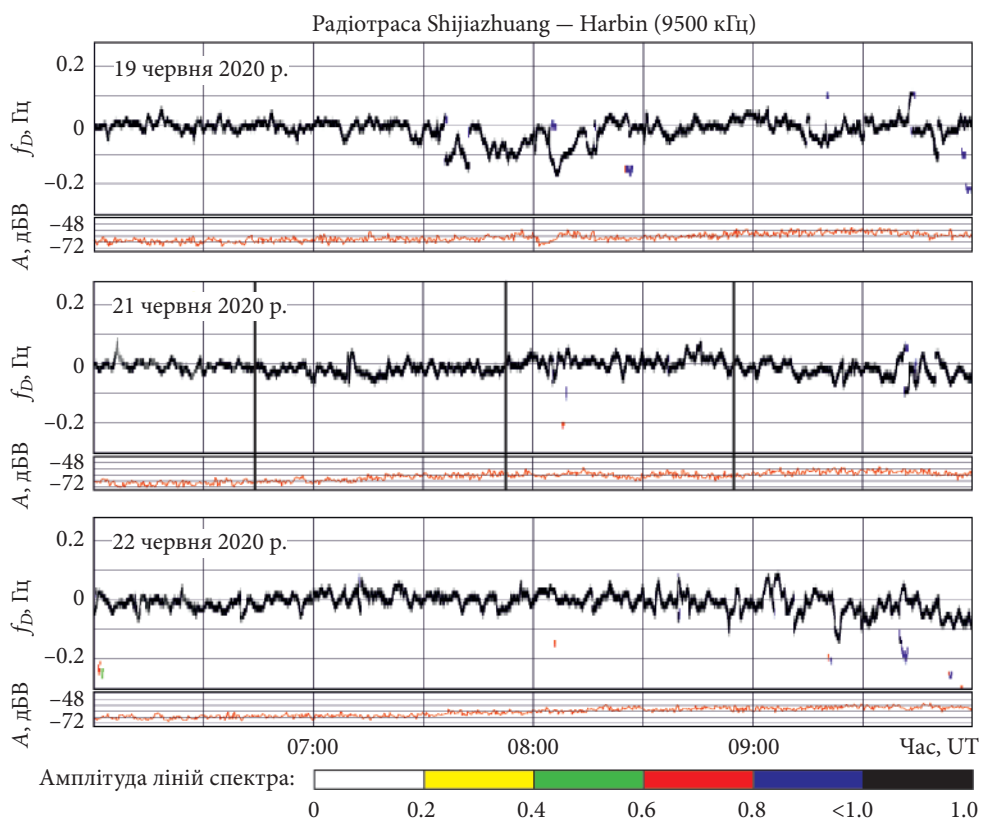


Рис. 7. Те, що на рис. 4, для радіотраси Shijiazhuang – Harbin

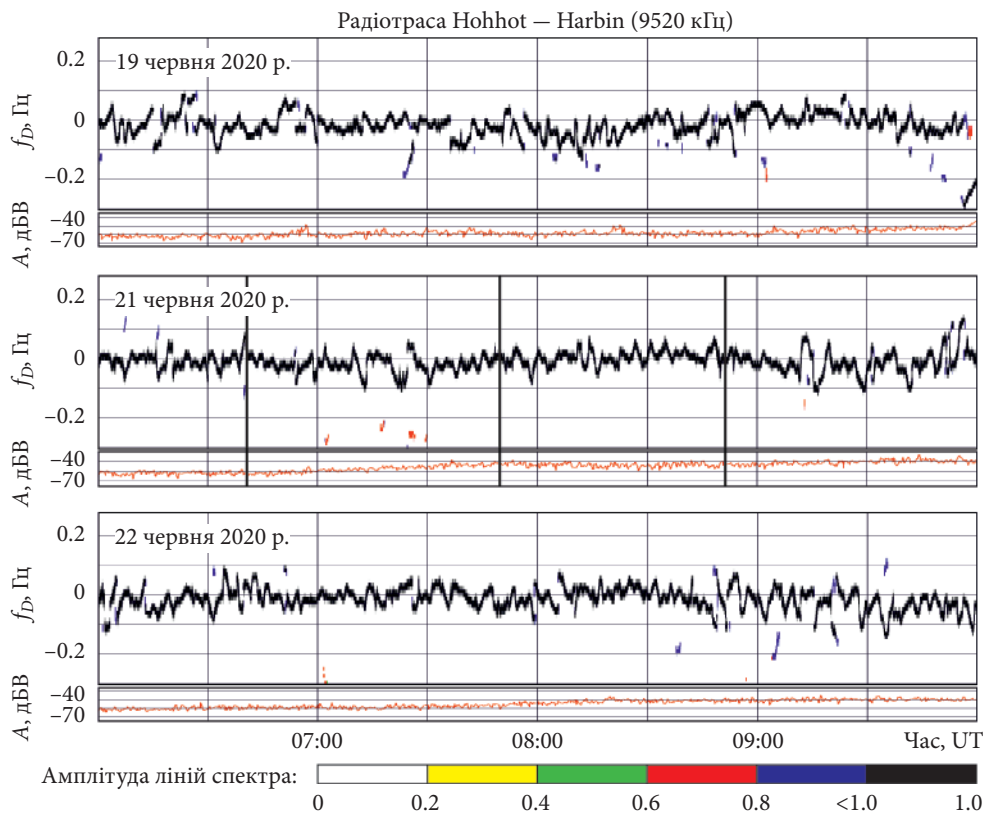


Рис. 8. Те, що на рис. 4, для радіотраси Hohhot — Harbin

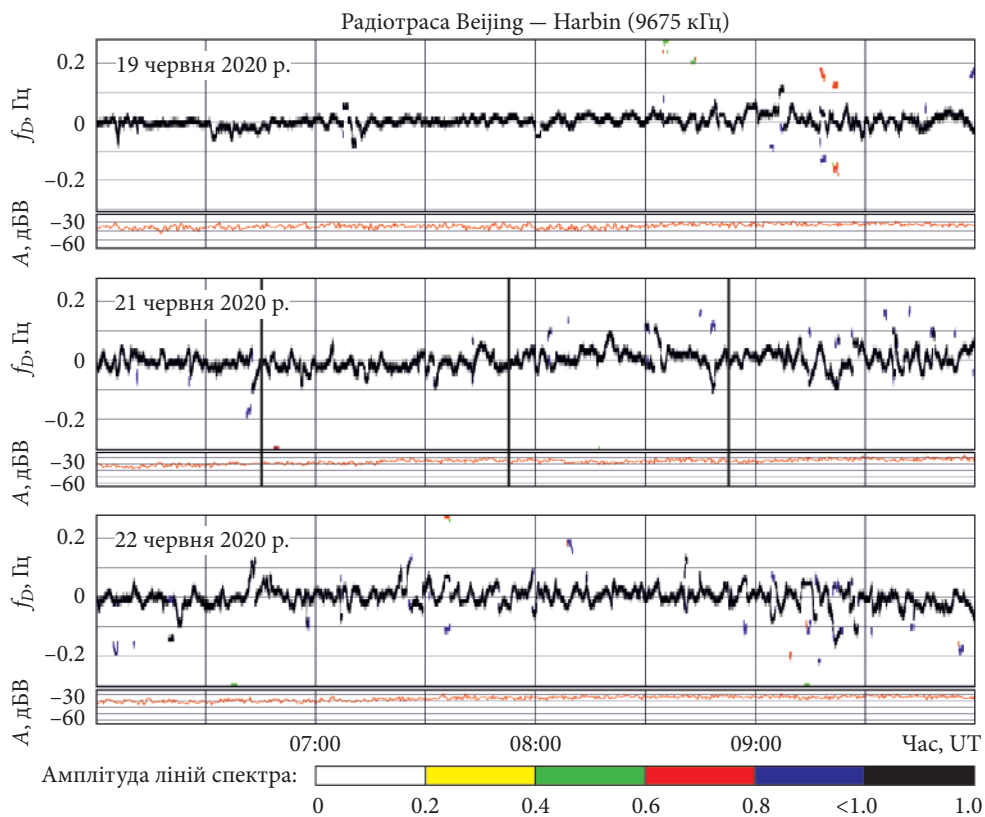


Рис. 9. Те, що на рис. 4, для радіотраси Beijing — Harbin

тренд $\overline{f_D} < 0$, а з 08:00 до 09:10 $\overline{f_D} > 0$. Подібні варіації ДЗЧ були відсутні в контрольні дні.

4.2. Часові варіації доплерівського зміщення частоти

Часові варіації ДЗЧ основної моди радіосигналу для різних радіотрас наведено на рис. 10–15. Для всіх радіотрас залежності $f_D(t)$ 21 червня 2020 р. в інтервалі часу 07:00–09:00 були якісно подібними. Упродовж першої години, в міру покриття диска Сонця, ДЗЧ залишалося від'ємним. Зі зменшенням покриття диска ДЗЧ стало додатним. Для п'яти радіотрас $f_D(t_{\max}) = 0$, де t_{\max} — момент часу максимального покриття. Залежність $f_D(t)$ відносно моменту часу t_{\max} була асиметричною. Це пов'язано, перш за все, зі зміною зенітного кута Сонця (див. табл. 2).

Основні параметри радіосигналу впродовж СЗ наведено у табл. 3. За даними таблиці, значення $f_{D\pm}$, які змінюються від -40 до 55 мГц, складним чином залежали від ступеня покриття диска Сонця, довжини траєкторії радіохвилі та її частоти. Зауважимо, що значення $f_{D\pm}$ були відносно невеликі. Для інших СЗ ДЗЧ досягало $0.4...0.5$ Гц.

4.3. Часові варіації спектрального складу доплерівського зміщення частоти

Приклад результатів ССА показано на рис. 16 і 17. З рис. 16 видно, що на радіотрасі Lintong/Pucheng — Harbin впродовж СЗ хвильова актив-

ність посилювалася, амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ в інтервалі часу 07:20–08:50 збільшилася до $50...100$ мГц. У контрольні дні в цьому інтервалі часу вона не перевищувала $20...30$ мГц. У всі дні в іоносфері відмічалися коливання з періодами T близько $4...5, 8...12$ і $19...24$ хв.

На радіотрасі Beijing — Harbin посилення хвильової активності спостерігалось 21 червня 2020 р. в інтервалі часу 07:25–09:00. При цьому амплітуда ДЗЧ f_{Da} збільшилася від $20...30$ до $40...60$ мГц. У спектрі переважали складові з періодами близько $5, 8$ і $17...18$ хв, а у контрольні дні — з періодами $3...4, 6$ і 8 хв (див. рис. 17).

5. Результати розрахунків

5.1. Зменшення концентрації електронів

На висотах $z \approx 80...200$ км справедливий квадратичний закон рекомбінації [27, 28], для якого рівняння балансу концентрації електронів має вигляд:

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2 = q_0(1 - A(t)) + q_c - \alpha N^2, \quad (1)$$

де $q = q_0(1 - A(t)) + q_c$ і q_c — швидкості іоноутворення за рахунок диска Сонця та його корони; $A(t)$ — функція покриття; α — коефіцієнт рекомбінації. Поблизу моменту часу t_{\max} , де $A(t_{\max}) = A_{\max}$ і $N(t_{\max}) = N_{\min}$, $dN/dt \approx 0$ з (1) маємо

$$q_0(1 - A_{\max}) + q_c = \alpha N_{\min}^2. \quad (2)$$

Таблиця 3. Основні параметри радіосигналу, радіотраси та іоносферних збурень

Параметр	Частота, кГц					
	5000	6015	6055	9500	9520	9675
f_{D-} , мГц	-16.7	-16	-40	-17	-11	-17
t_- , хв	60	50	60	70	60	80
f_{D+} , мГц	55.6	40	50	22	33	22
t_+ , хв	60	60	30	70	80	70
$\delta_{N_{\max}}$, %	-(20...26)	-(14...18)	-(12...16)	-(16...21)	-(15...20)	-(15...19)
Число стрибків	5	3	4	2	3	2
Довжина стрибка, км	~425	~360	~450	~685	~490	~560
f_{Da} , мГц	40	20	50	20	50	40
	100	40	80	30	70	60
T , хв	4	4	4	5	4	5
	8	8	8	18	10	17.5
δ_{Na} , %	0.5	0.3	0.7	0.8	6.2	1.1
	2.5	1.2	1.1	3.8	21.7	5.9

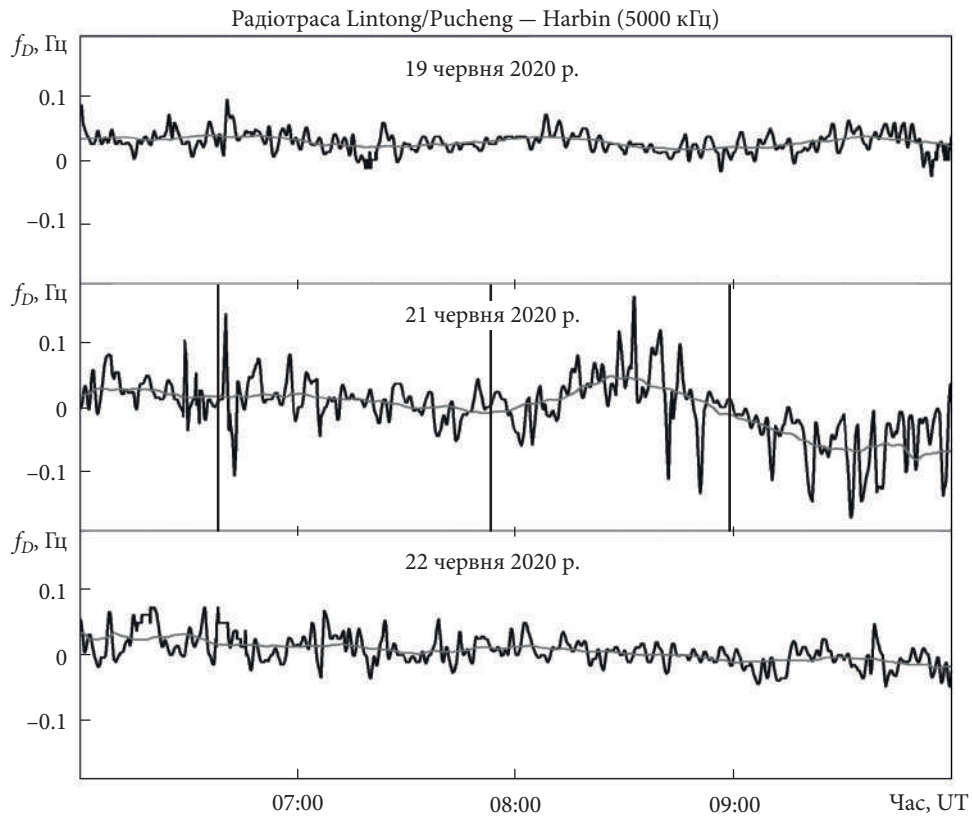


Рис. 10. Часові варіації ДЗЧ на радіотрасі Lintong/Pucheng — Harbin. Тренд отримано усередненням на інтервалі часу 30 хв

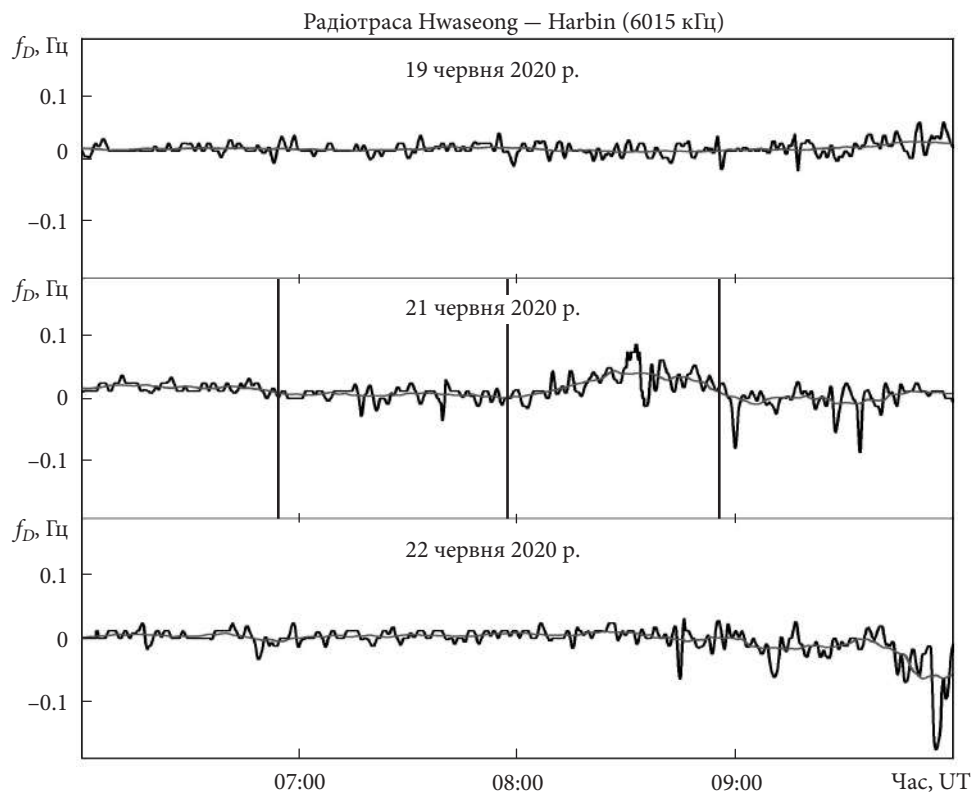


Рис. 11. Те, що на рис. 10, для радіотраси Hwaseong — Harbin

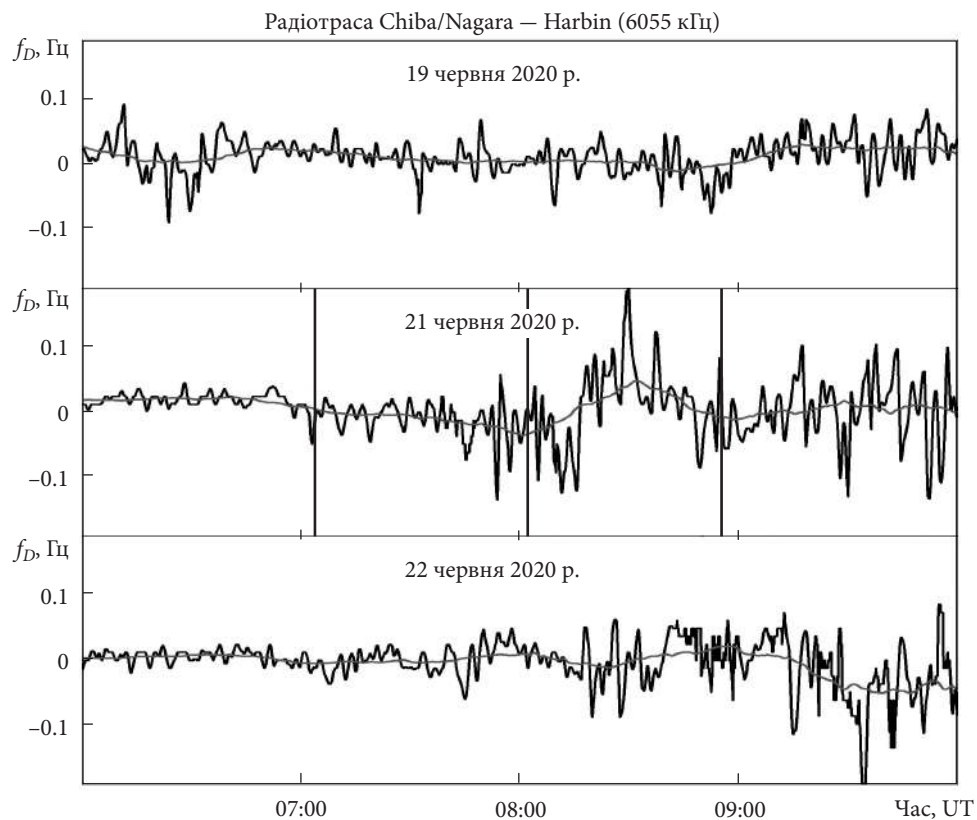


Рис. 12. Те, що на рис. 10, для радіотраси Chiba/Nagara — Harbin

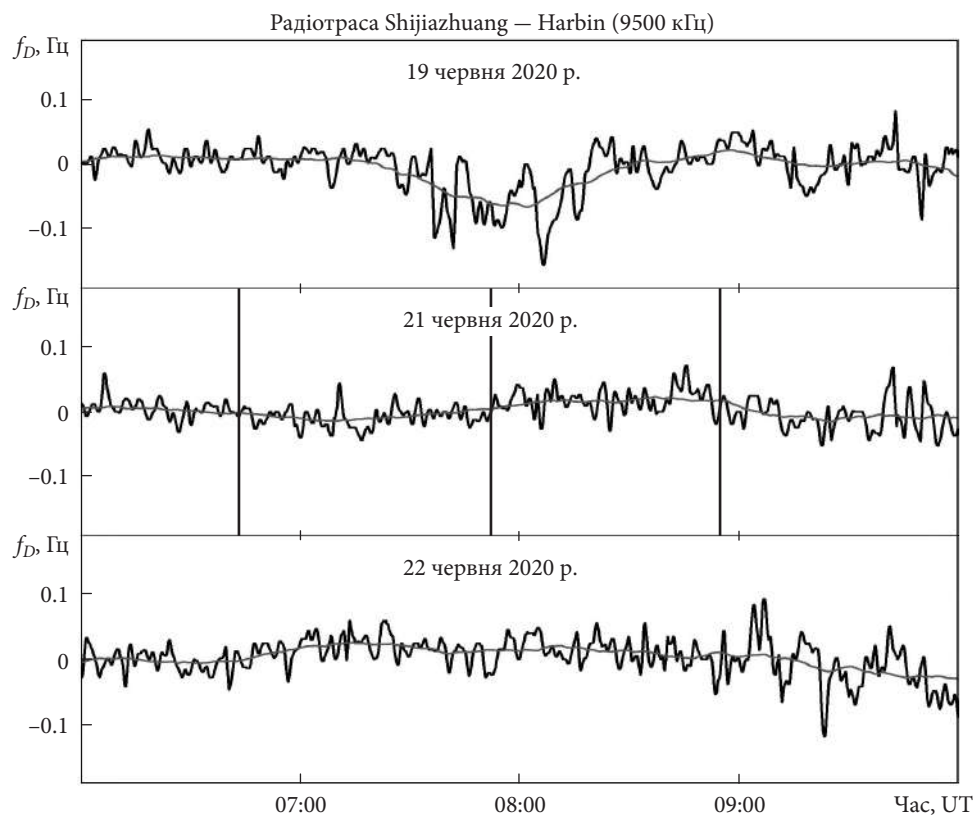


Рис. 13. Те, що на рис. 10, для радіотраси Shijiazhuang — Harbin

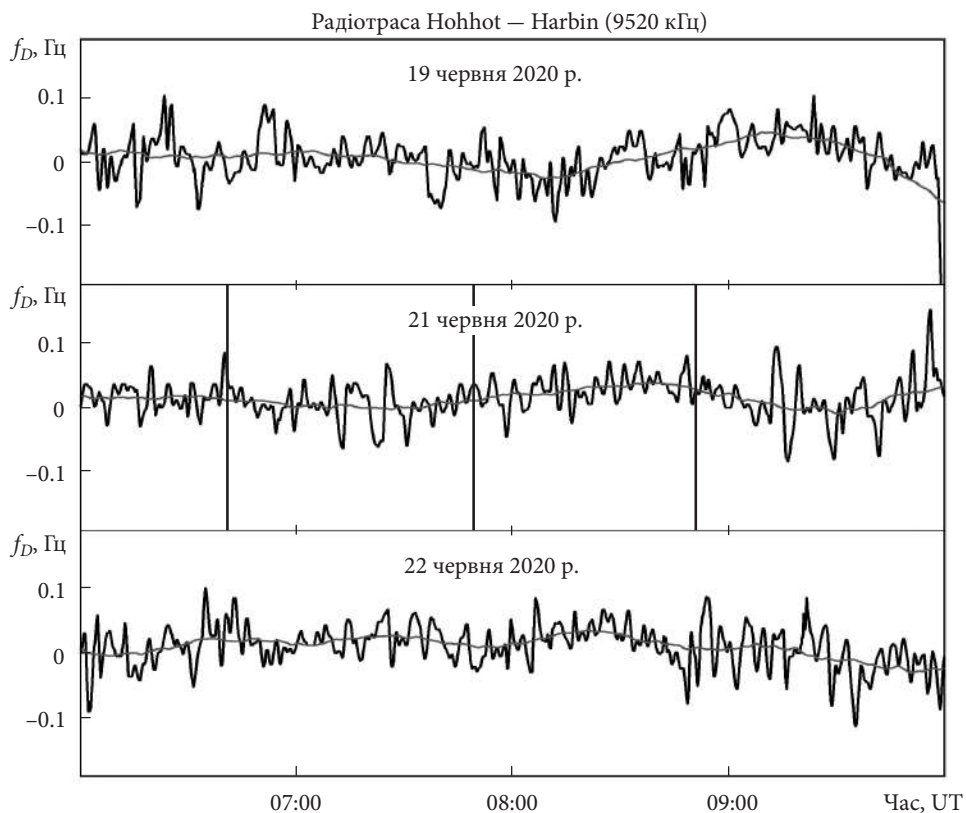


Рис. 14. Те, що на рис. 10, для радіотраси Hohhot — Harbin

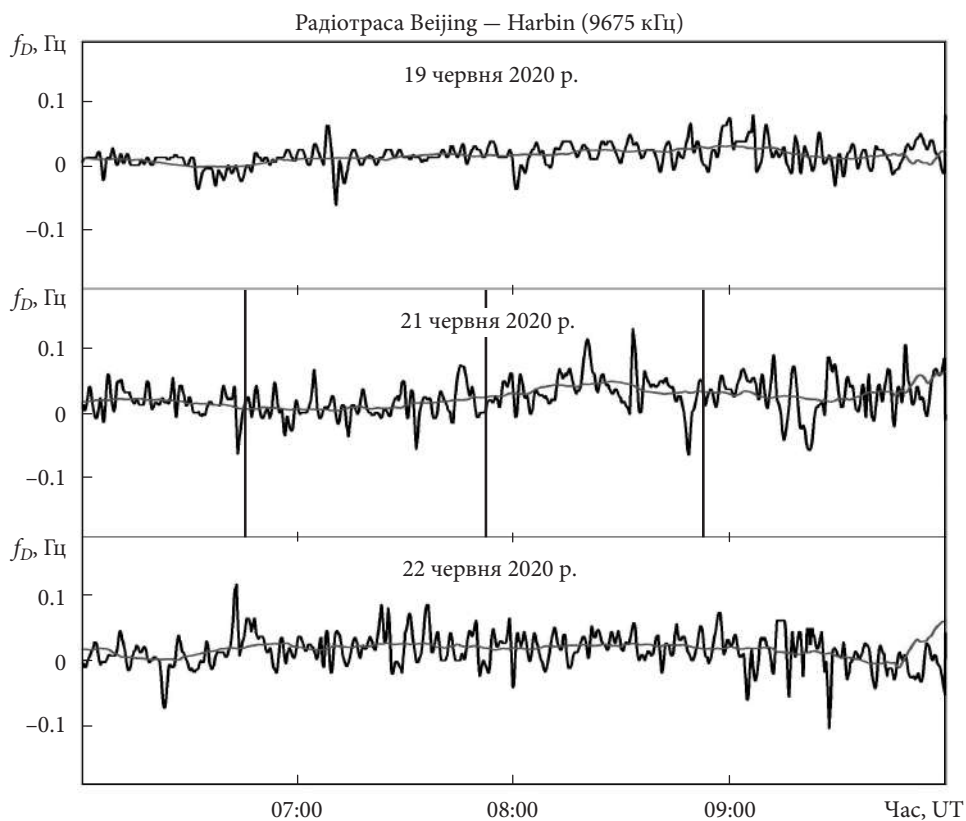


Рис. 15. Те, що на рис. 10, для радіотраси Beijing — Harbin

За відсутності затемнення справедливе аналогічне співвідношення:

$$q_0 + q_c = \alpha_0 N_0^2. \quad (3)$$

Індекс «0» відноситься до незбурених параметрів. З (2) і (3) за умови $\alpha \approx \alpha_0$ отримаємо

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{\frac{q_0(1 - A_{\max}) + q_c}{q_0 + q_c}} = \sqrt{\frac{1 - A_{\max} + \xi}{1 + \xi}}, \quad (4)$$

де $\xi = q_c / q_0$. Значення ξ точно не відоме, воно залежить від стану Сонця. Прийmemo, як у роботі [1], $\xi \approx 0.25$. Також можна записати

$$\eta_{\min} = \frac{N_{\min}}{N_0} - 1 = \sqrt{\frac{1 - A_{\max} + \xi}{1 + \xi}} - 1. \quad (5)$$

Якщо знехтувати впливом корони на іонізацію, то

$$\eta_{\min} = \sqrt{1 - A_{\max}} - 1. \quad (6)$$

Результати оцінок η_{\min} за співвідношеннями (5) і (6) наведені в табл. 3.

5.2. Однострибкове поширення

Розглянемо радіотраси довжиною $s \leq 2000$ км. При цьому для простоти кривизною Землі в першому наближенні можна знехтувати. Вираз для ДЗЧ має вигляд [29]:

$$f_D = -\frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_s n(t, s) ds. \quad (7)$$

Тут f — частота радіохвилі, c — швидкість світла, t — час, n — показник заломлення, s — траєкторія. Замінюючи істинну траєкторію двома відрізками, що сходяться на висоті z_r , з (7) маємо

$$f_D = -2 \frac{f}{c \cos \theta} \frac{d}{dt} \int_0^{z_r} n dz, \quad (8)$$

де θ — кут падіння радіохвилі на іоносферу, який відраховується від вертикалі. У роботі [29] наведено вираз для

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \quad (9)$$

де f_p — плазмова частота електронів.

З (9) отримуємо

$$2n \frac{dn}{dt} = -\frac{f_p^2}{f^2} \frac{d\delta_N}{dt}. \quad (10)$$

Тут δ_N — відносна зміна концентрації електронів. При похилому падінні на плазмовий шар із зростаючою електронною концентрацією відбиття радіохвилі має місце на висоті, де виконується умова

$$n = \sin \theta. \quad (11)$$

Тоді для висоти відбиття z_r з (9) і (11) отримуємо

$$\frac{f_p^2}{f^2} = \cos^2 \theta. \quad (12)$$

З урахуванням (10)—(12) з (8) випливає, що

$$f_D = \frac{f}{\operatorname{ctg} \theta} \int_0^{z_r} \frac{d\delta_N}{dt} dz. \quad (13)$$

Перепишемо (7) у вигляді

$$\int_0^t f_D(t) dt = \frac{f}{\operatorname{ctg} \theta} \int_0^{z_r} \delta_N(z) dz \approx \frac{f}{\operatorname{ctg} \theta} L_N \delta_N(z_r). \quad (14)$$

Тут L_N — характерний масштаб зміни δ_N .

У процесі затемнення в ідеальному випадку впродовж часу t_- ДЗЧ сигналу змінюється від 0 до f_{D-} , потім збільшується до 0. Далі ДЗЧ продовжує збільшуватися до f_{D+} , після чого поступово зменшується до 0 впродовж часу t_+ . Замінюючи інтеграл (14) його оцінкою, отримуємо, що

$$f_{D\pm} = 2f \frac{L_N}{ct_{\pm} \operatorname{tg} \theta} \delta_N. \quad (15)$$

Тут t_{\pm} — тривалість процесів з $f_D > 0$ і $f_D < 0$.

За допомогою співвідношення (15) оцінимо f_{D+} , наприклад, для радіотраси Lintong/Pucheng — Harbin. Вважаючи відстань між передавальним та приймальним пристроями $R = 1875$ км і висоту відбиття, де згідно з (12) $f_p(z_r) = f \cos \theta$, що дорівнює 80 км, отримуємо, що

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{2z_r} \approx 11.7.$$

При цьому $\theta \approx 85^\circ$, а $\cos \theta \approx 0.025$, $f_p(z_r) \approx 0.425$ МГц. Такій плазмовій частоті відповідає

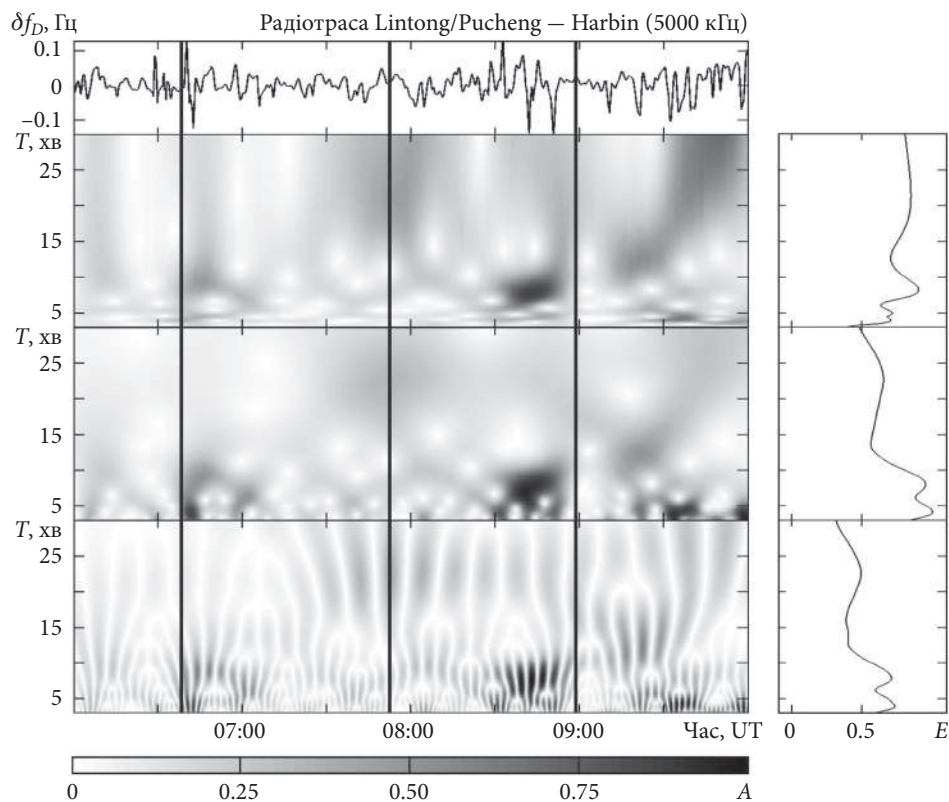


Рис. 16. Часові варіації флуктуацій ДЗЧ на радіотрасі Lintong/Pucheng – Harbin та результати ССА: ВПФ, АПФ та ВП (панелі зверху вниз). Праворуч показано розподіл енергії за періодами

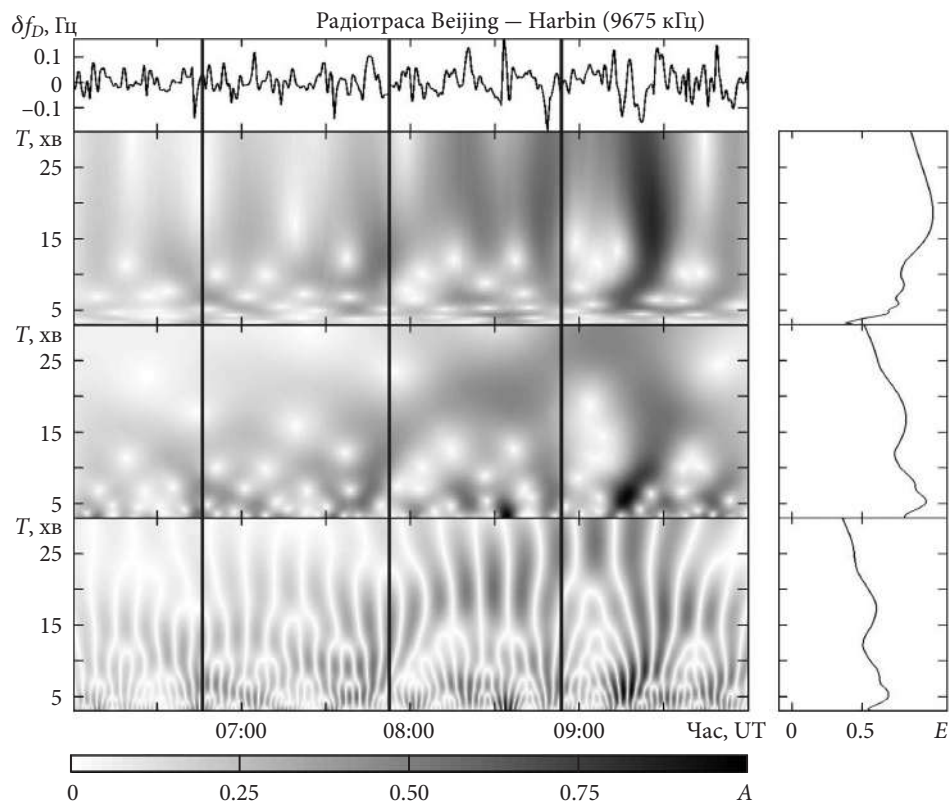


Рис. 17. Те, що на рис. 16, для радіотраси Beijing – Harbin

дають $N(z_r) \approx 2.2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ і $z_r \approx 80 \text{ км}$. Вважаючи $L_N \approx 10 \text{ км}$, $t_+ \approx 60 \text{ хв}$ і $\delta_{N\text{max}} = 0.20 \dots 0.26$, з (15) отримаємо

$$f_{D+} \approx 1.6 \dots 2.1 \text{ МГц.}$$

Результати спостережень дали $f_{D+} \approx 55.6 \text{ МГц}$. Відмінність у 35...27 разів неможливо пояснити недосконалістю прийнятих моделей ефекту Доплера та середовища. Причина криється в іншому.

Як показали спостереження на іонозондах, з 19 по 22 червня 2020 р. в E -області іоносфери відмічались спорадичні шари з $f_oE_s \approx 7.7 \dots 10.6 \text{ МГц}$, які майже весь час (21 червня 2020 р. — 80 % часу) екранували іоносферу, що лежить вище. Висота E_s -шару типу l дорівнювала 95...100 км. З 06:00 до 10:00 UT, тобто поблизу моментів часу СЗ, спостерігалися багаторазові (від 3 до 8) відбиття радіосигналів іонозонда; поглинання радіохвиль у нижній іоносфері було відносно невеликим. Слід очікувати багатострибкового поширення радіохвиль і при похилому зондуванні іоносфери.

5.3. Багатострибкове поширення

У випадку багатострибкового поширення співвідношення (15) набуває вигляду:

$$f_{D\pm} = 2f \frac{L_N}{ct_{\pm} \text{tg} \theta_1} \delta_{Nn_j}, \quad (16)$$

де n_j — число стрибків; $\text{tg} \theta_1 = R_1/2z_r$, $R_1 = R/n_j$ — довжина стрибка вздовж земної поверхні. Тоді з (16) маємо

$$n_j = \frac{1}{2} \left(\frac{ct_{\pm}}{L_N \delta_N} \frac{f_{D\pm}}{f} \frac{R}{z_r} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Результати оцінок n_j та довжини траєкторії стрибка s_1 при $z_r \approx 100 \text{ км}$ для різних радіотрас наведено в табл. 3. Видно, що кількість стрибків змінювалася від 2 до 5, а s_1 — від 360 до 560 км. При відбитті від шару E_s довжина

$$s_1 = 2 \frac{z_r}{\cos \theta_1} = \sqrt{(2z_r)^2 + R_1^2}.$$

5.4. Відносна амплітуда коливань концентрації електронів

Припустимо, що

$$f_D(t) = f_{Da} \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

де f_{Da} — амплітуда ДЗЧ. Тоді за півперіоду інтеграл

$$\int_{-T/4}^{T/4} f_D(t) dt = \frac{T}{\pi} f_{Da}. \quad (18)$$

Для квазіперіодичного процесу та однострибкового поширення співвідношення (14) набуває вигляду

$$\frac{T}{\pi} f_{Da} \approx \frac{f}{\text{ctg} \theta} L \delta_{Na}, \quad (19)$$

де L — масштаб зміни $\delta_N(t)$; δ_{Na} — амплітудне значення $\delta_N(t)$. При багатострибковому поширенні та когерентному додаванні коливань

$$\frac{T}{\pi} f_{Da} \approx \frac{f}{\text{ctg} \theta_1} L \delta_{Na} n_j = \frac{f}{c} \frac{2z_r}{R} L \delta_{Na} n_j^2. \quad (20)$$

Для атмосферних гравітаційних та інфразвукових хвиль $L = 2H$, де $H \approx 6.3 \dots 6.9 \text{ км}$ — висота однорідної атмосфери за умови $z \approx 90 \dots 100 \text{ км}$. Тоді з (20) отримуємо

$$\delta_{Na} = \frac{cT}{4\pi n_j^2 H} \frac{R}{z_r} \frac{f_{Da}}{f}. \quad (21)$$

Результати оцінок δ_{Na} за співвідношенням (21) для різних радіотрас при $H \approx 6.9 \text{ км}$ наведено у табл. 3. За даними таблиці, для $T \approx 4 \dots 5 \text{ хв}$ $\delta_{Na} \approx 0.3 \dots 6.2 \%$, а для $T \approx 10 \dots 18 \text{ хв}$ $\delta_{Na} \approx 4 \dots 22 \%$.

6. Обговорення

У роботі виконано аналіз часових варіацій ДС, ДЗЧ та АВС, викликаних СЗ 21 червня 2020 р. Поведінка характеристик радіосигналу якісно була схожою на їхню поведінку під час інших затемнень [1]. Так, упродовж СЗ ДС ставали дифузними, з'являлися нові моди. Цей ефект пояснюється посиленням багатопронемовості. Затемнення супроводжувалося асиметричними варіаціями ДЗЧ, причому $f_{D+} > |f_{D-}|$. На повільні (з характерним часом 30...60 хв) варіації ДЗЧ накладалися хаотичні зміни, в яких переважали квазіперіодичні коливання з періодами близько 4, 8 і 10...18 хв. Це пояснюється посиленням хвильової активності, що стимулюється затемненням.

Упродовж СЗ на деяких радіотрасах спостерігалось збільшення порівняно з контрольними днями АВС. Крім того, збільшувався рівень флуктуацій АВС. У флуктуаціях виділялися переважаючі періоди близько 2.5 і 5.0 хв. Амплітуда коливань досягала 5 дБВ. Збільшення рівня сигналу пояснюється зменшенням поглинання радіохвиль, спричиненого падінням упродовж затемнення концентрації електронів. Квазіперіодичні варіації АВС пов'язані з посиленням хвильової активності.

Поряд із загальними закономірностями, у варіаціях ДС, ДЗЧ і АВС виявлялися також особливості, властиві цьому затемненню. До них, насамперед, належить аномально мале значення ДЗЧ ($\sim 0.01...0.05$ Гц). Зазвичай, за умови $A_{\max} \approx 0.35...0.45$ значення $|f_{D\pm}| \approx 0.3...0.5$ Гц [1]. Причина відмінностей полягає в наступному. Упродовж СЗ майже весь час на висоті близько 100 км існував шар E_s . Через наявність шару E_s відбиття радіохвиль усіх частот відбувалося від нього чи нижче, тобто у нижній іоносфері. Тут концентрація електронів істотно (на порядки) нижча, ніж у F-області.

У випадку однострибкового поширення радіохвилі, що відбивається, лише двічі перетинала нижню іоносферу і ДЗЧ при цьому не перевищувало $\sim 1...2$ мГц. Таке значення перебуває на межі можливостей вимірювального комплексу. Одночасно з однострибковим поширенням мало місце і багатострибкове поширення радіохвиль. Як показали оцінки, число стрибків не перевищувало п'яти для мінімальної частоти 5 000 кГц і двох — для частот 9 500 і 9 675 кГц. Більше п'яти стрибків не реалізовувалося з двох причин. По-перше, при збільшенні n_j збільшувалося число перетинів нижньої іоносфери, а отже, поглинання радіохвиль та ослаблення рівня радіосигналу (відбувалося падіння відношення сигнал/шум). По-друге, радіопередавальні системи, як правило, мають діаграми направленості антен із провалами в зенітному напрямку, що обмежує значення кута падіння θ на іоносферу, а отже, і кількість стрибків.

Наступна особливість іоносферних ефектів упродовж досліджуваного СЗ полягає у тому, що спостерігалось посилення хвильової активності у діапазоні періодів 4...5 хв. Пояснимо це.

Як відомо, періоди акустичної відсічки та Брента-Вайсяля (див., наприклад, [26, 27])

$$T_A = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\gamma g}{2H} \left(1 - \frac{H}{H_T}\right)}}, \quad T_B = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{H} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{H}{H_T}\right)}}$$

де g — прискорення вільного падіння; $H_T = T_a(dz/dT_a)$, $T_a(z)$ — температура атмосфери; $\gamma \approx 1.4$ — показник адиабати. За умови $T_a = 190...210$ К у діапазоні висот 90...100 км маємо $H_T \approx 100$ км, $H = 6.3...6.9$ км. При цьому $T_A \approx 4.47...4.54$ хв, $T_B \approx 4.49...4.66$ хв. Як видно, T_A і T_B на цих висотах дуже близькі. Періоди T_A і T_B відносяться до власних періодів атмосфери. Тому збільшення амплітуди ДЗЧ поблизу періодів T_A і T_B можна трактувати як посилення коливань атмосфери на власних частотах, яке викликане СЗ. Слід додати, що коливання ДЗЧ з $T \approx 4...5$ хв існували і в контрольні дні, а також до та після СЗ. Їхня амплітуда, однак, була приблизно вдвічі меншою, ніж упродовж затемнення.

Сонячне затемнення супроводжувалося також посиленням коливань ДЗЧ з періодами близько 8 хв, а на інших радіотрасах — з T від 10 до 18 хв. Період $T \approx 8$ хв був близьким до подвоєного періоду T_A або T_B .

На відміну від інших СЗ, упродовж досліджуваного затемнення періоди $T > 20$ хв, які властиві атмосферним гравітаційним хвилям, не спостерігалися. Це могло бути зумовлено таким фактом. При швидкості атмосферної гравітаційної хвилі $v \approx 300$ м/с її довжина $\lambda \approx 360$ км. При довжині стрибка $s_1 \neq \lambda$ мало місце додавання несинфазних коливань і помітне зменшення значень f_{Da} , що не дозволило виявити за допомогою ССА коливання з $T > 20$ хв.

7. Основні результати

Спостереження за варіаціями характеристик радіохвиль ВЧ-діапазону проводилися в день СЗ та в контрольні дні. Сонячне затемнення супроводжувалося дифузністю ДС унаслідок посилення багатопроменивості. Часові варіації ДЗЧ були двополярними й асиметричними, причому $|f_{D-}| < f_{D+}$. Екстремальні значення f_{D-} змінювалися від -11 до -40 мГц, а значення f_{D+} — від

22 до 56 мГц. Тривалість процесів із від'ємним значенням ДЗЧ варіювала від 50 до 80 хв, тривалість процесів із додатним значенням ДЗЧ — від 30 до 80 хв. На всіх радіотрасах поширення було багатострибковим (від двох до п'яти стрибків). Довжина одного стрибка змінювалася від 360 до 560 км. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ становила 20...50 мГц для періоду 4...5 хв та 40...100 мГц — для періоду 8...18 хв. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації

електронів змінювалася в межах 0.3...6.2 % для періоду 4...5 хв та в межах 1.1...21.7 % — для періоду 8...18 хв. Відносне зменшення концентрації електронів на різних радіотрасах варіювало від -(12...16) до -(20...26) %.

Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 та 0122U001476).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Черногор Л.Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография*. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2013. 480 с.
2. Le H., Liu L., Ren Z., Chen Y., and Zhang H. Effects of the 21 June 2020 solar eclipse on conjugate hemispheres: A modeling study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, Iss. 11. DOI: 10.1029/2020JA028344.
3. Zhang R., Le H., Li W., Ma H., Yang Y., Huang H., Li Q., Zhao X., Xie H., Sun W., Li G., Chen Y., Zhang H., and Liu L. Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 June 2020 solar eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 125, Iss. 12. DOI: 10.1029/2020JA028450.
4. Huang F., Li Q., Shen X., Xiong C., Yan R., Zhang S.-R., Wang W., Aa E., Zhong J., Dang T., and Lei J. Ionospheric responses at low latitudes to the annular solar eclipse on 21 June 2020. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, Iss. 10. DOI: 10.1029/2020JA028483.
5. Dang T., Lei J.H., Wang W.B., Yan M.D., Ren D.X., and Huang F.Q. Prediction of the thermospheric and ionospheric responses to the 21 June 2020 annular solar eclipse. *Earth Planet. Phys.* 2020. Vol. 4, Iss. 3. P. 231–237. DOI: 10.26464/epp2020032.
6. Patel K. and Singh A.K. Changes in atmospheric parameters due to annular solar eclipse of June 21, 2020, over India. *Indian J. Phys.* 2021. DOI: 10.1007/s12648-021-02112-2.
7. Wang X., Li B., Zhao F., Luo X., Huang L., Feng P., and Li X. Variation of Low-Frequency Time-Code Signal Field Strength during the Annular Solar Eclipse on 21 June 2020: Observation and Analysis. *Sensors.* 2021. Vol. 21, Iss. 4. DOI: 10.3390/s21041216.
8. Wang J., Zuo X., Sun Y.-Y., Yu T., Wang Y., Qiu L., Mao T., Yan X., Yang N., Qi Y., Lei J., Sun L., and Zhao B. Multilayered sporadic-E response to the annular solar eclipse on June 21, 2020. *Space Weather.* 2021. Vol. 19, Iss. 3. DOI: 10.1029/2020SW002643.
9. Şentürk E., Arqim A.M., and Saqib M. Ionospheric total electron content response to annular solar eclipse on June 21, 2020. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 67, Iss. 6. P. 1937–1947. DOI: 10.1016/j.asr.2020.12.024.
10. Sun Y.-Y., Chen C.-H., Qing H., Xu R., Su X., Jiang C., Yu T., Wang J., Xu H., and Lin K. Nighttime ionosphere perturbed by the annular solar eclipse on June 21, 2020. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, Iss. 9. DOI: 10.1029/2021JA029419.
11. Shagimuratov I.I., Zakharenkova I.E., Tepenitsyna N.Y., Yakimova G.A., and Efshov I.I. Features of the Ionospheric Total Electronic Content Response to the Annular Solar Eclipse of June 21, 2020. *Geomagn. Aeron.* 2021. Vol. 61. P. 756–762. DOI: 10.1134/S001679322105011X.
12. Aa E., Zhang S.-R., Shen H., Liu S., and Li J. Local and conjugate ionospheric total electron content variation during the 21 June 2020 solar eclipse. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 68, Iss. 8. P. 3435–3454. DOI: 10.1016/j.asr.2021.06.015.
13. Chen Y., Feng P., Liu C., Chen Y., Huang L., Duan J., Hua Y., and Li X. Impact of the annular solar eclipse on June 21, 2020 on BPL time service performance. *AIP Adv.* 2021. Vol. 11, id. 115003. DOI: 10.1063/5.0064445.
14. Huang L., Liu C., Chen Y., Wang X., Feng P., and Li X. Observations and analysis of the impact of annular eclipse on 10 MHz short-wave signal in Sanya area on June 21, 2020. *AIP Advances.* 2021. Vol. 11, id. 115317. DOI: 10.1063/5.0068778.
15. Tripathi G., Singh S. B., Kumar S., Singh Ashutosh K., Singh R., and Singh A.K. Effect of 21 June 2020 solar eclipse on the ionosphere using VLF and GPS observations and modeling. *Adv. Space Res.* 2022. Vol. 69, Iss. 1. P. 254–265. DOI: 10.1016/j.asr.2021.11.007.
16. Кашцев С.Б., Зализовский А.В., Колосков А.В., Галушко В.Г., Пикулик И.И., Ямпольский Ю.М., Куркин В.И., Литовкин Г.И., Орлов А.И. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2009. Т. 14, № 4. С. 353–367.
17. Гармаш К.П., Леус С.Г., Черногор Л.Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2011. Т. 16, № 2. С. 164–177.
18. Chen G., Wu C., Huang X., Zhao Z., Zhong D., Qi H., Huang L., Qiao L., and Wang J. Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. Vol. 120, Iss. 4. P. 3009–3020.
19. Uryadov V.P., Kolchev A.A., Vybornov F.I., Shumakov V.V., Egoshin A.I., and Chernov A.G. Ionospheric Effects of a Solar Eclipse of March 20, 2015 on Oblique Sounding Paths in the Eurasian Longitudinal Sector. *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. Vol. 59. P. 431–441. DOI: 10.1007/s11141-016-9711-9.
20. Cohen M.B., Gross N.C., Higginson-Rollins M.A., Marshall R.A., Gołkowski M., Liles W., Rodriguez D. and Rockway J. The lower ionospheric VLF/LF response to the 2017 Great American Solar Eclipse observed across the continent. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, Iss. 8. P. 3348–3355. DOI: 10.1002/2018GL077351.

21. Rozhnoi A., Solovieva M., Shalimov S., Ouzounov D., Gallagher P., Verth G., McCauley J., Shelyag S. and Fedun V. The effect of the 21 August 2017 total solar eclipse on the phase of VLF/LF signals. *Earth Space Sci.* 2020. Vol. 7, Iss. 2. DOI: 10.1029/2019EA000839.
22. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., and Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. Vol. 186. P. 88–103. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.003.
23. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L.F., Garmash K.P., and Rozumenko V. T. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019. Т. 30. С. 3–15. DOI: 10.26565/2311-0872-2019-30-01.
24. Guo Q., Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T. and Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 2020. Vol. 55, Iss. 2. DOI: 10.1029/2019RS006866.
25. Marple Jr.S.L. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1987. 492 p.
26. Chernogor L.F. Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomagn. Aeron.* 2008. Vol. 48, Iss. 5. P. 652–673. DOI: 10.1134/S0016793208050101.
27. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988. 528 с.
28. Schunk R.W. and Nagy A.F. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 554 p.
29. Davies K. *Ionospheric Radio Waves*. Blaisdell Publishing Company, 1969. 460 p.

Стаття надійшла 03.03.2022

REFERENCES

1. Chernogor, L.F., 2013. *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace*. Kharkiv, Ukraine: V.N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
2. Le, H., Liu, L., Ren, Z., Chen, Y., and Zhang, H., 2020. Effects of the 21 June 2020 solar eclipse on conjugate hemispheres: A modeling study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **125**(11). DOI: 10.1029/2020JA028344.
3. Zhang, R., Le, H., Li, W., Ma, H., Yang, Y., Huang, H., Li, Q., Zhao, X., Xie, H., Sun, W., Li, G., Chen, Y., Zhang, H., and Liu, L., 2021. Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 June 2020 solar eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **125**(12). DOI: 10.1029/2020JA028450.
4. Huang, F., Li, Q., Shen, X., Xiong, C., Yan, R., Zhang, S.-R., Wang, W., Aa, E., Zhong, J., Dang, T., and Lei, J., 2020. Ionospheric responses at low latitudes to the annular solar eclipse on 21 June 2020. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **125**(10). DOI: 10.1029/2020JA028483.
5. Dang, T., Lei, J.H., Wang, W.B., Yan, M.D., Ren, D.X., and Huang, F.Q., 2020. Prediction of the thermospheric and ionospheric responses to the 21 June 2020 annular solar eclipse. *Earth Planet. Phys.*, **4**(3), pp. 231–237. DOI: 10.26464/epp2020032.
6. Patel, K., and Singh, A.K., 2021. Changes in atmospheric parameters due to annular solar eclipse of June 21, 2020, over India. *Indian J. Phys.* DOI: 10.1007/s12648-021-02112-2.
7. Wang, X., Li, B., Zhao, F., Luo, X., Huang, L., Feng, P., and Li, X., 2021. Variation of Low-Frequency Time-Code Signal Field Strength during the Annular Solar Eclipse on 21 June 2020: Observation and Analysis. *Sensors*, **21**(4). DOI: 10.3390/s21041216.
8. Wang, J., Zuo, X., Sun, Y.-Y., Yu, T., Wang, Y., Qiu, L., Mao, T., Yan, X., Yang, N., Qi, Y., Lei, J., Sun, L., and Zhao, B., 2021. Multilayered sporadic-E response to the annular solar eclipse on June 21, 2020. *Space Weather*, **19**(3). DOI: 10.1029/2020SW002643.
9. Şentürk, E., Arqim, A.M., and Saqib, M., 2021. Ionospheric total electron content response to annular solar eclipse on June 21, 2020. *Adv. Space Res.*, **67**(6), pp. 1937–1947. DOI: 10.1016/j.asr.2020.12.024.
10. Sun, Y.-Y., Chen, C.-H., Qing, H., Xu, R., Su, X., Jiang, C., Yu, T., Wang, J., Xu, H., and Lin, K., 2021. Nighttime ionosphere perturbed by the annular solar eclipse on June 21, 2020. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **126**(9). DOI: 10.1029/2021JA029419.
11. Shagimuratov, I.I., Zakharenkova, I.E., Tepenitsyna, N.Y., Yakimova, G.A., and Efshov, I.I., 2021. Features of the Ionospheric Total Electronic Content Response to the Annular Solar Eclipse of June 21, 2020. *Geomagn. Aeron.*, **61**, pp. 756–762. DOI: 10.1134/S001679322105011X.
12. Aa, E., Zhang, S.-R., Shen, H., Liu, S., and Li, J., 2021. Local and conjugate ionospheric total electron content variation during the 21 June 2020 solar eclipse. *Adv. Space Res.*, **68**(8), pp. 3435–3454. DOI: 10.1016/j.asr.2021.06.015.
13. Chen, Y., Feng, P., Liu, C., Chen, Y., Huang, L., Duan, J., Hua, Y., and Li, X., 2021. Impact of the annular solar eclipse on June 21, 2020 on BPL time service performance. *AIP Adv.*, **11**, id. 115003. DOI: 10.1063/5.0064445.
14. Huang, L., Liu, C., Chen, Y., Wang, X., Feng, P., and Li, X., 2021. Observations and analysis of the impact of annular eclipse on 10 MHz short-wave signal in Sanya area on June 21, 2020. *AIP Adv.*, **11**, id. 115317. DOI: 10.1063/5.0068778.
15. Tripathi, G., Singh, S.B., Kumar, S., Singh, Ashutosh K., Singh, R., and Singh, A.K., 2022. Effect of 21 June 2020 solar eclipse on the ionosphere using VLF and GPS observations and modeling. *Adv. Space Res.*, **69**(1), pp. 254–265. DOI: 10.1016/j.asr.2021.11.007.
16. Kascheev, S.B., Zalizovski, A.V., Koloskov, A.V., Galushko, V.G., Pikulik, I.I., Yampolski, Yu.M., Kurkin, V.I., Litovkin, G.I., and Orlov, A.I., 2009. Frequency Variations of HF Signals at Long-Range Radio Paths during a Solar Eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.*, **14**(4), pp. 353–367.
17. Garmash, K.P., Leus, S.G., and Chernogor, L.F., 2011. January 4, 2011 Solar Eclipse Effects over Radio Circuits at Oblique Incidence. *Radio Phys. Radio Astron.*, **16**(2), pp. 164–177.
18. Chen, G., Wu, C., Huang, X., Zhao, Z., Zhong, D., Qi, H., Huang, L., Qiao, L., and Wang, J., 2015. Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**(4), pp. 3009–3020.
19. Uryadov, V.P., Kolchev, A.A., Vybornov, F.I., Shumaev, V.V., Egoshein, A.I., and Chernov, A.G., 2016. Ionospheric Effects of a Solar Eclipse of March 20, 2015 on Oblique Sounding Paths in the Eurasian Longitudinal Sector. *Radiophys. Quantum Electron.*, **59**, pp. 431–441. DOI: 10.1007/s11141-016-9711-9.

20. Cohen, M.B., Gross, N.C., Higginson-Rollins, M.A., Marshall, R.A., Gólkowski, M., Liles, W., Rodriguez, D., and Rockway J., 2018. The lower ionospheric VLF/LF response to the 2017 Great American Solar Eclipse observed across the continent. *Geophys. Res. Lett.*, **45**(8), pp. 3348–3355. DOI: 10.1002/2018GL077351.
21. Rozhnoi, A., Solovieva, M., Shalimov, S., Ouzounov, D., Gallagher, P., Verth, G., McCauley, J., Shelyag, S., and Fedun, V., 2020. The effect of the 21 August 2017 total solar eclipse on the phase of VLF/LF signals. *Earth Space Sci.*, **7**(2). DOI: 10.1029/2019EA000839.
22. Guo, Q., Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Rozumenko, V.T., and Zheng, Y., 2019. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **186**, pp. 88–103. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.003.
23. Guo, Q., Zheng, Y., Chernogor, L.F., Garmash, K.P., and Rozumenko, V.T., 2019. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Ser. «Radio Physics and Electronics»*, **30**, pp. 3–15. DOI: 10.26565/2311-0872-2019-30-01.
24. Guo, Q., Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Rozumenko, V.T., and Zheng, Y., 2020. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.*, **55**(2). DOI: 10.1029/2019RS006866.
25. Marple JR., S. L., 1987. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
26. Chernogor, L.F., 2008. Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomagn. Aeronom.*, **48**(5), pp. 652–673. DOI: 10.1134/S0016793208050101.
27. Bryunelli, B.E., and Namgaladze, A.A., 1987. *Physics of the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
28. Schunk, R.W., and Nagy, A.F., 2000. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.
29. Davies, K., 1969. *Ionospheric Radio Waves*. Blaisdell Publishing Company.

Received 03.03.2022

L.F. Chernogor, K.P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, V.T. Rozumenko, Y. Zheng

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

CHARACTERISTIC FEATURES OF VARIATIONS
IN HF RADIO WAVE PARAMETERS IN THE IONOSPHERE DURING
THE COURSE OF THE SOLAR ECLIPSE OF JUNE 21, 2020 OVER
THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

Subject and Purpose. The study of the effect that each new Solar eclipse (SE) has on radio wave characteristics is an actual scientific and technical issue. The purpose of the present work is to analyze the variations in Doppler spectra (DS), Doppler shift of frequency (DSF), and in the reflected wave amplitude (RWA) that were observed during the SE of June 21, 2020 over the People's Republic of China.

Methods and Methodology. The observations of HF radio wave characteristics were made using the Harbin Engineering University multi-frequency multipath coherent radio system. The temporal variations in DS, DSF of the main ray and RWA are analyzed further. The variations in the DSF were subjected to a systematic spectral analysis that involved joint application of the windowed Fourier transform, adaptive Fourier decomposition, and the Morlet mother-function-based wavelet transformation.

Results. The SE was accompanied by DS diffuseness resulting from an increase in the number of rays. The DSF temporal variations were observed to be bi-polar and asymmetrical, with extreme DSF magnitudes varying from –11 to –40 mHz and from 22 to 56 mHz. The duration of processes with negative DSF values varied from 50 to 80 min, and the duration of processes with positive DSF changed from 30 to 80 min. The multi-hop propagation (from two to five hops) took place along all propagation paths, with a 360 to 560 km one-hop range. The 4...5 min period quasi-periodic DSF variations showed 20...50 mHz amplitude, and the 8...18 min period variations exhibited 40...100 mHz amplitude. The relative amplitudes of the 4...5 min period quasi-periodic variations in the electron density were observed to be in the 0.3...6.2% range, and the amplitudes of the 8...18 min period variations were found to be in the 1.1...21.7% range. A decrease in the electron density along different propagation paths was observed to vary from –(12...16)% to –(20...26)%.

Conclusions. The characteristic features of the variations in HF radio wave parameters in the ionosphere have been studied during the SE of June 21, 2020 over the People's Republic of China.

Keywords: Solar eclipse, HF radio wave, ionosphere, oblique radio sounding, Doppler spectrum, Doppler shift, reflected wave amplitude.