

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.218>УДК 550.385.37:550.388 Y. LUO¹, Л. Ф. ЧОРНОГОР¹, К. П. ГАРМАШ¹,
Q. GUO², YU. ZHENG³¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com² Harbin Engineering University,
145-1, Nantong St., Nangang District,
150001 Harbin, Heilongjiang, China³ Qingdao University,
08, Ningxia Road, 266071 Qingdao, Shandong, China

СЕЙСМО-ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ: РЕЗУЛЬТАТИ ПОХИЛОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

Предмет і мета роботи: Предметом радіофізичного дослідження є динамічні процеси в іоносфері над Китаєм, що слідували за трьома помірними (магнітуда $5.9 \div 6.6$) землетрусами в Японії в 2018–2019 рр. Відстань від епіцентру землетрусу до середини радіотраси змінювалася приблизно від 1300 до 2000 км. Метою роботи є викладення результатів спостереження динамічних процесів в іоносфері, що супроводжували землетруси в Японії, та їх порівняльний аналіз.

Методи і методологія: Для безперервного спостереження за станом іоносфери на висотах $\sim 100 \div 300$ км використовувався багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, розроблений фахівцями Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Україна) та Харбінського інженерного університету (КНР, 45.78° пн. ш., 126.68° сх. д.). В основі функціонування комплексу лежать вимірювання значень доплерівського зміщення частоти f_D й амплітуд відбитих від іоносфери радіохвиль. Доплерівські спектри обчислюються на інтервалі часу 20 с. Роздільна здатність за частотою становить 0.02 Гц, за часом – 7.5 с.

Результати: Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на відстанях щонайменше $1 \div 2$ тис. км від епіцентру, посиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів. Були також виявлені хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період $4 \div 5$ хв), генерованих сейсмічною хвилею (швидкість ≈ 3 км/с). Відносна амплітуда δ_N квазіперіодичних варіацій концентрації електронів N при цьому становила $4.5 \div 9\%$. Тривалість цугу коливань була в межах $24 \div 55$ хв. Відносна амплітуда δ_{Na} варіацій концентрації електронів з періодом $\approx 15 \div 30$ хв, викликаних поширенням атмосферної гравітаційної хвилі, становила $30 \div 55\%$. Тривалість хвильового цугу досягала приблизно 100 хв, швидкість – близько 0.3 км/с. Виявлено, що характер варіацій доплерівських спектрів, доплерівського зміщення частоти основної моди й амплітуди сигналу в день землетрусу 5 вересня 2018 р. та в контрольні дні помітно відрізнявся. Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень: 3.3 км/с і ≈ 500 м/с. Перша швидкість близька до швидкості сейсмічних хвиль, а друга – до швидкості атмосферної гравітаційної хвилі в іоносфері Землі. Відносна амплітуда в полі інфразвукової хвилі й атмосферної гравітаційної хвилі була $\delta_N \approx 1.5 \div 3\%$ і $\delta_{Na} \approx 6 \div 7.5\%$ відповідно. Землетрус 11 квітня 2019 р. супроводжувався розширенням доплерівських спектрів на $1 \div 1.5$ Гц в діапазоні частот $5 \div 9.8$ МГц, генерацією атмосферної гравітаційної хвилі зі швидкістю $0.5 \div 1$ км/с і періодом $8 \div 20$ хв, і генерацією інфразвуку з періодом $2 \div 5$ хв та зі швидкістю $0.3 \div 0.4$ км/с.

Висновки: Встановлено, що помірні землетруси з магнітудою ≈ 6 викликають динамічні процеси в іоносфері на відстанях щонайменше $1 \div 2$ тис. км. Переносником збурень є сейсмічні хвилі зі швидкістю ≈ 3 км/с і акустико-гравітаційні хвилі з періодом від одиниць до десятків хвилин та зі швидкістю $0.3 \div 1$ км/с.

Ключові слова: землетруси, похиле зондування іоносфери, доплерівські спектри, аперіодичні й квазіперіодичні збурення, сейсмічні хвилі, акустико-гравітаційні хвилі

1. Вступ

Дослідження останніх десятиліть показують, що оболонки Землі – тектоносфера, атмосфера, іоносфера та магнітосфера – не є ізольованими (див., наприклад, [1–4]). Між ними існують прямі та зворотні, позитивні, що призводять до підсилення певного збурення, та негативні, що призводять до за-

гасання певного збурення, зв'язки. Взаємодія активізується із впливом потужних джерел енерговиділення природного або техногенного походження.

Землетруси являють собою систематично, хоч і випадково, діюче джерело енерговиділення, що призводить до активізації взаємодії підсистем у системі тектоносфера – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

Інтерес до сейсмо-атмосферно-іоносферних ефектів виник у середині 1960-х рр. [5–8]. Було встановлено, що взаємодія підсистем забезпечується за рахунок генерації та поширення сейсмічних, інфразвукових і атмосферних гравітаційних хвиль. Вперше були виявлені іоносферні ефекти землетрусів.

Автори робіт [9–17] теоретично вивчали сейсмо-атмосферно-іоносферні ефекти.

Для експериментального дослідження сейсмо-іоносферних ефектів використовувався цілий арсенал наземних і наземно-космічних методів: вертикального зондування [18], магнітометричний [18], похилого зондування [19–22], часткових відбиттів [19–23], ДНЧ-зондування [24], GPS-технології [25, 26] тощо.

Дослідження сейсмо-іоносферних збурень триває і на цей час [27–38]. Підтверджено, що хвильові збурення в іоносфері генеруються під дією сейсмічних, інфразвукових і атмосферних гравітаційних хвиль, відстежено рух хвильового фронту від епіцентру землетрусу, оцінено збурення повного електронного вмісту концентрації електронів N , швидкості руху хвиль, їх періоди. Спостереження виконано для різних землетрусів за різних умов. Однак залишається невстановленим, як величина та характер сейсмо-іоносферних ефектів залежать від стану атмосферної та космічної погоди, а також магнітуди і глибини епіцентру землетрусу. Дотепер вивчалися сейсмо-іоносферні ефекти для унікальних землетрусів з магнітудою $M \approx 8 \div 9$. Цікавим є пошук іоносферних ефектів, викликаних помірними землетрусами ($M \approx 6$). Енергія таких сейсмічних подій у тисячі – десятки тисяч разів менша від енергії унікальних землетрусів. Слід з'ясувати, на які відстані поширюються сейсмо-іоносферні збурення при помірних землетрусах, які їхні параметри й особливості.

Таким чином, дослідження сейсмо-іоносферних ефектів залишається актуальною задачею.

Метою роботи є викладення результатів спостереження динамічних процесів в іоносфері, які супроводжували помірні землетруси в Японії, та їх порівняльного аналізу.

2. Засоби спостереження

Для безперервного спостереження за станом іоносфери на висотах $\sim 100 \div 300$ км використовувався багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери,

розроблений фахівцями Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Україна) та Харбінського інженерного університету (КНР). Комплекс розміщено на території Харбінського інженерного університету (45.78° пн. ш., 126.68° сх. д.) [39–41]. В основі функціонування комплексу лежать вимірювання значень доплерівського зміщення частоти $f_D(t)$ та амплітуд відбитих від іоносфери радіохвиль. Доплерівські спектри обчислюються на інтервалі часу 20 с. Роздільна здатність за частотою складає 0.02 Гц, за часом – 7.5 с. Це досягається використанням для спектрального аналізу авторегресійного алгоритму [42].

Для фільтрації прийнятого сигналу застосовуються послідовно два GNU Radio-блока комплексних низькочастотних фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою та вікном Хеммінга. Характеристики фільтрів наведено в табл. 1.

Для моніторингу динамічних процесів в іоносфері використовується до 14 радіотрас різної протяжності й орієнтації [40].

Аналізу підлягали часові варіації доплерівських спектрів, доплерівського зміщення частоти основної та інших мод, а також амплітуд сигналу. Обчислювалися тренди $\overline{f_D(t)}$, а також квазіперіодичні варіації $\delta f_D = f_D - \overline{f_D}$.

3. Відомості про землетруси

Перший з трьох землетрусів в Японії, сейсмо-іоносферні ефекти яких розглядаються в цій статті, стався 7 липня 2018 р. об 11:23:50 UT. Координати епіцентру: 35.107° пн. ш., 140.42° сх. д. Глибина вогнища $h \approx 40$ км, епіцентр знаходився під водою. Магнітуда $M \approx 5.9$.

Другий землетрус з магнітудою $M \approx 6.6$ відбувся 5 вересня 2018 р. о 18:07:59 UT. Його координати: 42.686° пн. ш., 141.929° сх. д. Глибина вогнища $h \approx 35$ км.

Таблиця 1. Характеристики комплексних низькочастотних фільтрів

Параметр	Фільтр 1	Фільтр 2
Потік вхідних даних(відліків за 1 с)	6250000	12500
Частота обрізання на рівні -3 дБ, Гц	12500	25
Ширина смуги переходу	2000	5
Коефіцієнт підсилення, дБ	10	10
Коефіцієнт децимації	500	500

Третій землетрус (підводний) з магнітудою $M \approx 6.0$ спостерігався о 08:18:21 UT 11 квітня 2019 р. поблизу берегів Японії. Координати епіцентру наступні: 40.41° пн. ш., 143.298° сх. д. Глибина вогнища $h \approx 18$ км.

4. Стан космічної погоди

Для коректної інтерпретації процесів в іоносфері ретельно аналізувався стан космічної погоди.

Для аналізу стану космічної погоди використовувалися число Вольфа W й індекс $F_{10.7}$, що описують сонячну активність, а також магнітні індекси K_p , D_{st} та A_p . Значення цих індексів у дні

землетрусів і в найближчі дні наведені в табл. 2, 3 та 4. При побудові цих таблиць використовувалися дані із сайтів Світового центру даних з геомагнетизму, Японія (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>) та Національної метеорологічної служби США (National Weather Service, USA, <<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>>).

З табл. 2, 3 і 4 видно, що стан космічної погоди був цілком сприятливим для спостереження сейсмо-іоносферних ефектів.

Іоносферний стан контролювався за допомогою іонозонду, розташованого поблизу м. Вакканай

Таблиця 2. Стан космічної погоди 4–10 липня 2018 р.

Дата	W	$F_{10.7}$	$K_{p\max}$	$K_{p\min}$	$D_{st\max}$, нТл	$D_{st\min}$, нТл	A_p
4 липня 2018 р.	0	68	1+	1–	14	2	4
5 липня 2018 р.	0	68	5–	0+	15	–23	17
6 липня 2018 р.	0	71	4–	1–	12	–12	7
7 липня 2018 р.	0	72	2	1–	5	–10	5
8 липня 2018 р.	0	72	1+	0+	2	–4	4
9 липня 2018 р.	0	73	1–	0	4	–2	2
10 липня 2018 р.	0	72	2+	0+	20	0	6

Таблиця 3. Стан космічної погоди 1–7 вересня 2018 р.

Дата	W	$F_{10.7}$	$K_{p\max}$	$K_{p\min}$	$D_{st\max}$, нТл	$D_{st\min}$, нТл	A_p
1 вересня 2018 р.	0	68	2	0+	1	–12	4
2 вересня 2018 р.	0	68	2	0+	0	–9	4
3 вересня 2018 р.	0	68	1+	0+	8	–2	4
4 вересня 2018 р.	0	68	3	1–	18	–17	8
5 вересня 2018 р.	0	68	3+	1	–4	–23	10
6 вересня 2018 р.	0	67	2	0+	11	–13	4
7 вересня 2018 р.	0	68	2+	0+	21	–7	4

Таблиця 4. Стан космічної погоди 8–14 квітня 2019 р.

Дата	W	$F_{10.7}$	$K_{p\max}$	$K_{p\min}$	$D_{st\max}$, нТл	$D_{st\min}$, нТл	A_p
8 квітня 2019 р.	12	79	3+	2–	–5	–27	11
9 квітня 2019 р.	12	79	3+	2–	–1	–21	9
10 квітня 2019 р.	13	78	4	1	–9	–34	14
11 квітня 2019 р.	13	79	3–	1–	–1	–17	6
12 квітня 2019 р.	14	77	3	1	–1	–21	7
13 квітня 2019 р.	14	78	3	0+	0	–17	7
14 квітня 2019 р.	11	75	2–	0+	2	–11	4

(Японія, 45.16° пн. ш., 141.75° сх. д.). У денний час критична частота області E $f_{oE} \approx 2 \div 3$ МГц, критична частота шару F2 $f_{oF2} \approx 4 \div 5$ МГц. В нічний час $f_{oF2} \approx 3.5 \div 4$ МГц.

5. Результати багаточастотних багатотрасових спостережень

5.1. Землетрус 7 липня 2018 р.

Для прикладу тут і далі наведено результати спостережень за можливими сейсмо-іоносферними ефектами на двох радіотрасах.

Радіотраса Хвасон–Харбін (Hwaseong–Harbin). Радіостанція розташована в Південній

Корей. Частота радіохвилі $f \approx 6015$ кГц, відстань уздовж земної поверхні $R \approx 950$ км. Відстань від епіцентру до середини траси $D \approx 1400$ км. Часові залежності доплерівських спектрів і амплітуди сигналу A показані на рис. 1, а. Більшу частину часу хвиля відбивалася від шару іоносфери E_s . У контрольні дні флуктуації головного максимуму в спектрі не перевищували 0.1 Гц. Ширина спектру досягала $4 \div 5$ Гц.

У день землетрусу 07 липня 2018 р. доплерівський спектр розширювався в бік позитивних зміщень до +2 Гц і більше. Це тривало з 12:45 до 13:00 UT. Потім мало місце розширення в бік

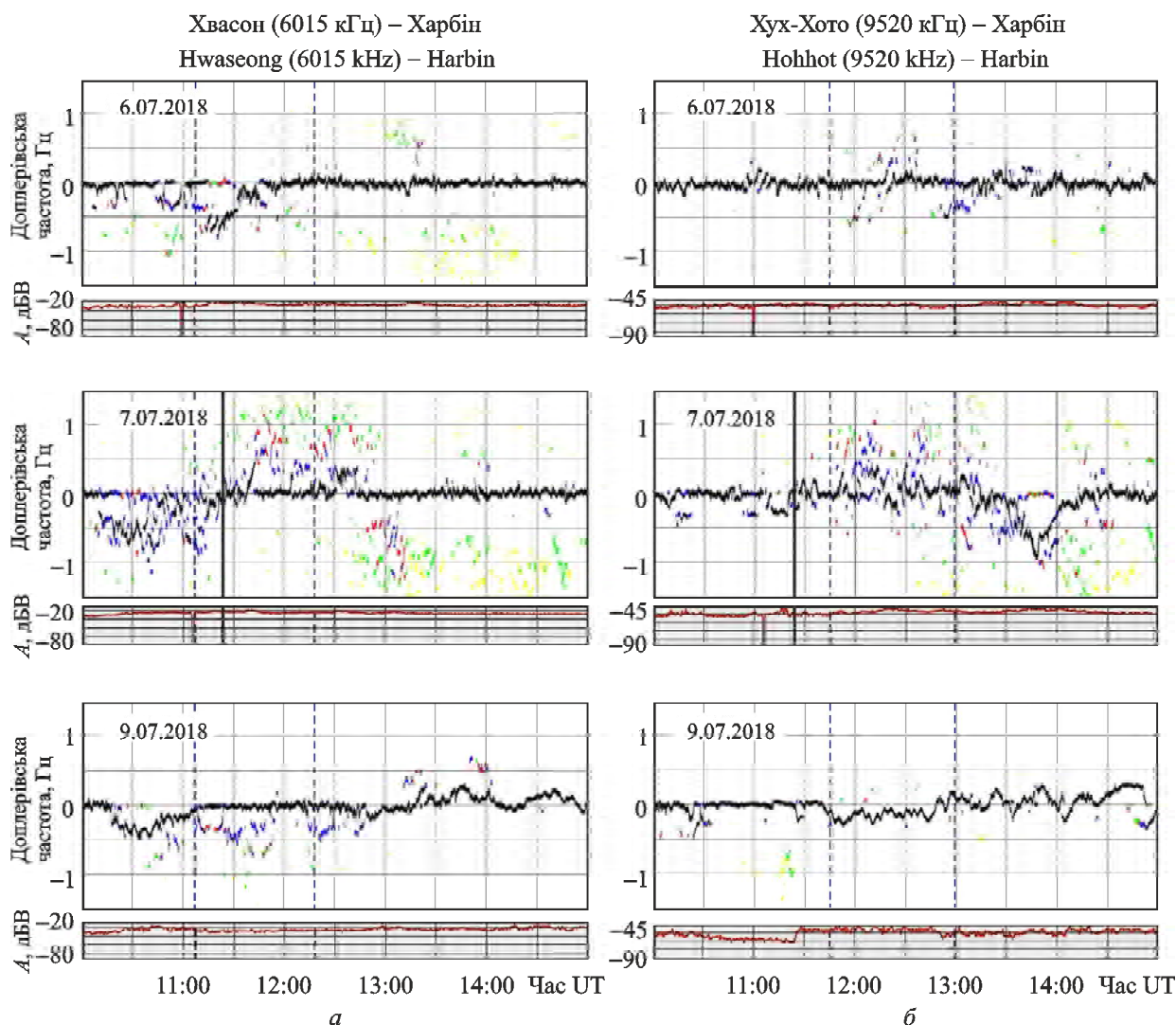


Рис. 1. Часові варіації доплерівських спектрів і амплітуди сигналу, зареєстрованого 6, 7 і 9 липня 2018 р. на радіотрасах Хвасон–Харбін (Hwaseong–Harbin) (а) і Хух-Хото–Харбін (Hohhot–Harbin) (б). Тут і далі неперервна вертикальна лінія на середніх панелях відповідає моменту землетрусу, вертикальні штрихові лінії на панелях – моментам сходу Сонця на висотах 100 і 0 км

негативних значень до -2.5 Гц. Тривалість цього процесу – $30 \div 40$ хв.

Радіотраса Хух-Хото–Харбін (Hohhot–Harbin). Китайська радіостанція випромінює на частоті 9520 кГц, $R \approx 1343$ км, $D \approx 2060$ км. У контрольні дні доплерівські спектри займали смугу частот $1 \div 1.5$ Гц. 9 липня 2018 р. після $11:40$ UT відбиття також відбувалося від області F і шару E_s іоносфери. У цей день, крім коливання з періодом $T \approx 5$ хв, спостерігалися коливання з періодом $T \approx 30$ хв.

Як видно з рис. 1, б, в день землетрусу доплерівські спектри були сильно дифузними та займали смугу частот приблизно $3 \div 3.5$ Гц. В інтервалі часу $11:50$ – $13:20$ спектри були зміщені здебільшого в бік позитивних значень, а з $13:20$ і

до $14:00$ – в бік негативних значень. Приблизно об $11:41$ сталося руйнування квазіперіодичного коливання з періодом $T \approx 5$ хв і амплитудою $f_{Da} \approx 0.2$ Гц. Нове коливання з $T \approx 12$ хв і $f_{Da} \approx 0.25 \div 0.30$ Гц ресструвалося в інтервалі часу $12:30$ – $13:10$, тобто мало тривалість $\Delta T \approx 40$ хв.

5.2. Землетрус 5 вересня 2018 р.

Радіотраса Хвасон–Харбін (Hwaseong–Harbin). Для радіопередавального пристрою, що випромінює на частоті 6015 кГц, відстань $D \approx 1279$ км. Часові залежності доплерівських спектрів наведені на рис. 2, а. У контрольні дні з $17:00$ до $19:30$ UT доплерівське зміщення частоти $f_D(t) \approx 0$ Гц. 4 вересня 2018 р. епізодично з'являлася друга, більш слабка, мода. Звичайно термін “мода” ви-

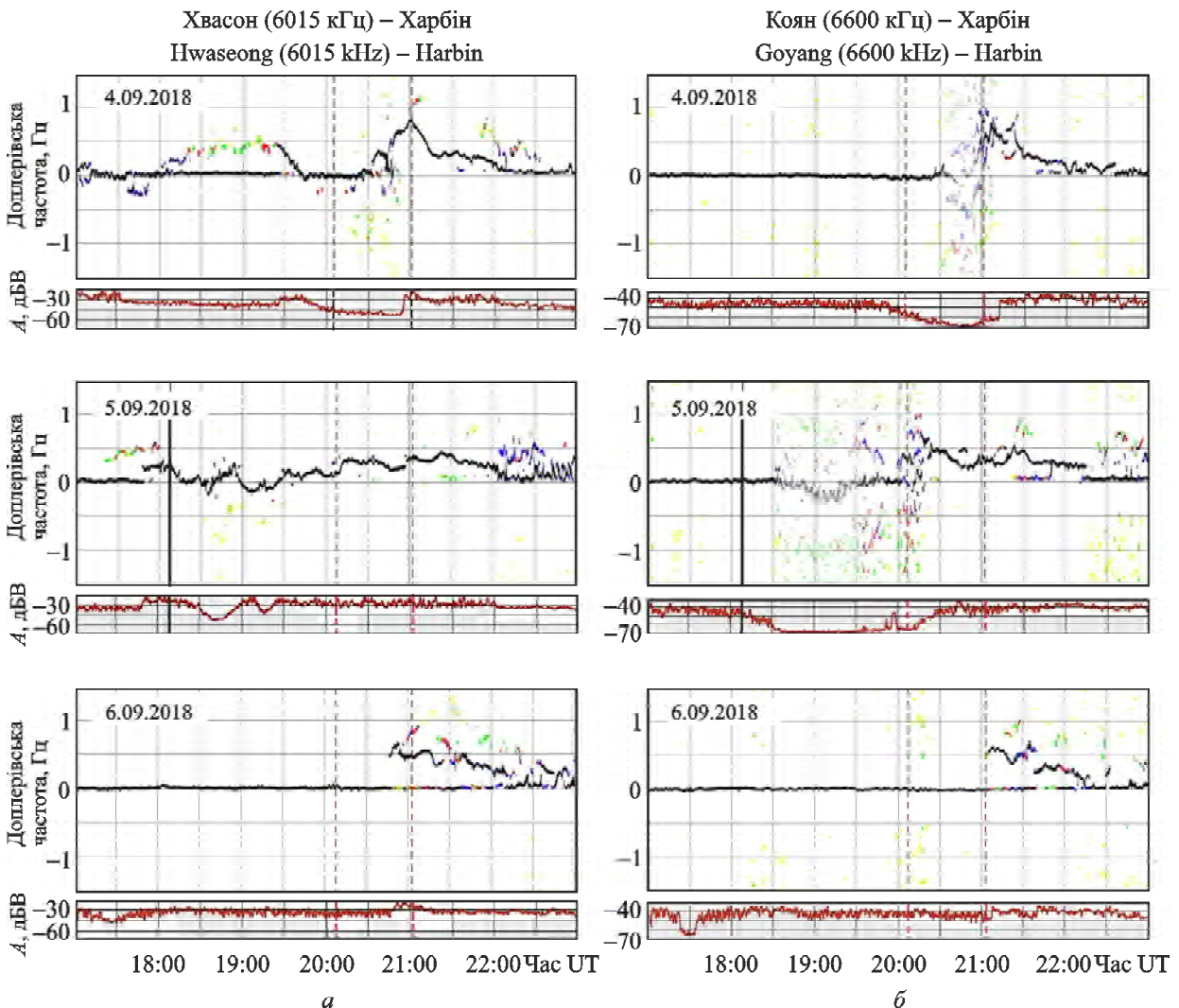


Рис. 2. Часові варіації доплерівських спектрів і амплітуди сигналу, зареєстрованого 4, 5 та 6 вересня 2018 р. на радіотрасах Хвасон–Харбін (Hwaseong–Harbin) (а) та Коян–Харбін (Goyang–Harbin) (б)

користується для позначення просторових компонент. Оскільки просторові компоненти мають різні доплерівські зміщення частоти, то цей термін може вживатися для позначення треків на доплерограмах (часових залежностях доплерівського зсуву частоти). Після сходу Сонця на висотах іоносфери $f_D(t)$ різко збільшилося до $0.7 \div 0.8$ Гц, а потім, поступово флюктууючи, зменшувалося до 0 Гц.

5 вересня 2018 р., в день землетрусу, до 17:50 $f_D(t) \approx 0$ Гц. В інтервалі часу 17:20–18:00 УТ спостерігалася друга, більш слабка, мода. О 17:50 $f_D(t)$ основної моди різко збільшилося від 0 до $0.20 \div 0.25$ Гц. Перша зміна характеру варіацій $f_D(t)$ мала місце близько 18:20, друга – близько 18:56. Далі спостерігалися квазіперіодичні варіації $f_D(t)$ з періодом $T \approx 30$ хв, амплітудою $f_{Da} \approx 0.20 \div 0.25$ Гц і тривалістю близько 150 хв. Крім того, відзначалися слабкі (з амплітудою $f_{Da} \approx 0.05 \div 0.10$ Гц) квазіперіодичні варіації з періодом $T \approx 3$ хв. З 18:30 до 19:30 мали місце значні (до 30 дБВ) варіації амплітуди сигналу, відсутні в контрольні дні.

Радіотраса Коян–Харбін (Goyang–Harbin). Радіостанція, яка випромінює на частоті 6600 кГц, розташована в Південній Кореї. Відстані $R \approx 907$ км та $D \approx 1272$ км. З рис. 2, а видно, що в контрольні дні до 20:30 УТ $f_D(t) \approx 0$ Гц. Після зазначеного часу спостерігалися значні варіації доплерограм.

У день землетрусу приблизно о 18:30 УТ доплерівські спектри стали дифузними, доплерівське зміщення частоти основної моди, флюктууючи з періодом близько 3 хв, спочатку зменшувалося від 0 до -0.2 Гц, а потім збільшувалося від -0.2 до 0 Гц (рис. 2, б). Це тривало близько 60 хв. З 19:30 до 20:00 УТ доплерівське зміщення частоти основної моди $f_D(t) \approx 0$ Гц. Після 20:00 мали місце значні (до 0.3 Гц) варіації $f_D(t)$. В інтервалі часу з 17:50 до 19:25 спостерігалися сильні (до 30 дБВ) варіації рівня амплітуди сигналу.

5.3. Землетрус 11 квітня 2019 р.

Радіотраса Хвасон–Харбін (Hwaseong–Harbin). Для цього землетрусу відстань $D \approx 1415$ км.

З 10 до 12 квітня 2019 р. в інтервалі часу 07:00–10:45 УТ спостерігалася мода з $f_D(t) \approx 0$ (рис. 3, а). Приблизно з 08:00 виникла друга мода, для якої доплерівське зміщення частоти зменшувалося від

-0.2 до -0.5 Гц. Перед заходом Сонця (після 09:30) кількість мод збільшилася. Це тривало до 10:30. Потім доплерівський спектр був переважно одномодовим. Після 11:30 флюктуації $f_D(t)$ збільшувалися до $0.3 \div 0.4$ Гц.

У день землетрусу спостерігалися дві відмінності в доплерівських спектрах. По-перше, в інтервалі часу 08:55–09:25 УТ різко зменшилося значення $f_D(t)$ від $-(0.20 \div 0.25)$ Гц до $-(0.50 \div 0.55)$ Гц. По-друге, з 09:25 до 10:40 у доплерівському спектрі чітко спостерігалися 4 моди, віддалені одна від одної на $0.2 \div 0.3$ Гц.

Флюктуації амплітуд протягом всіх трьох діб практично не відрізнялися.

Радіотраса Шицзячжуан–Харбін (Shijiazhuang–Harbin). Радіопередавальний пристрій, що функціонує на частоті 9500 кГц, дислокований на території КНР. При цьому відстань $R \approx 1310$ км, а $D \approx 1950$ км.

У контрольні дні в інтервалі часу 07:00–10:00 УТ доплерівське зміщення частоти $f_D(t) \approx 0$, радіохвиля, швидше за все, відбивалася від шару E_s (рис. 3). 11 квітня, тобто в день землетрусу, подібна ситуація спостерігалася до 08:50. З 08:50 до 09:50 виявлені квазіперіодичні варіації $f_D(t)$ з періодом $T \approx 15$ хв і амплітудою $f_{Da} \approx 0.10 \div 0.12$ Гц. Крім того, значення $f_D(t)$ зменшувалися від -0.1 до -0.2 Гц. В інтервалі часу 09:55–10:50 доплерівські спектри стали дифузними. Одночасно з цим амплітуда сигналу зменшувалася на 10 дБВ, чого не спостерігалася в контрольні дні.

6. Обговорення

У роботі зроблено спробу виявлення реакції іоносфери на помірні ($M \approx 6$) землетруси, епіцентри яких віддалені від середини радіотраси на відстані $\sim 1300 \div 2000$ км. При пошуку реакції відмічалися будь-які зміни в часових варіаціях доплерівських спектрів і амплітуд сигналу на різних радіотрасах, які спостерігалися після сейсмічної події та були відсутні до неї. Крім того, зазначені зміни повинні були бути відсутніми в контрольні дні. Приймалася гіпотеза, що ці зміни можуть бути викликані землетрусом. Далі визначалися часові затримки Δt можливої реакції на землетрус та обчислювалася удавана швидкість v поширення збурень. Для квазіперіодичних процесів визначалися також період T і амплітуда варіацій f_{Da} . Швидкість оцінювалася з очевидної формули

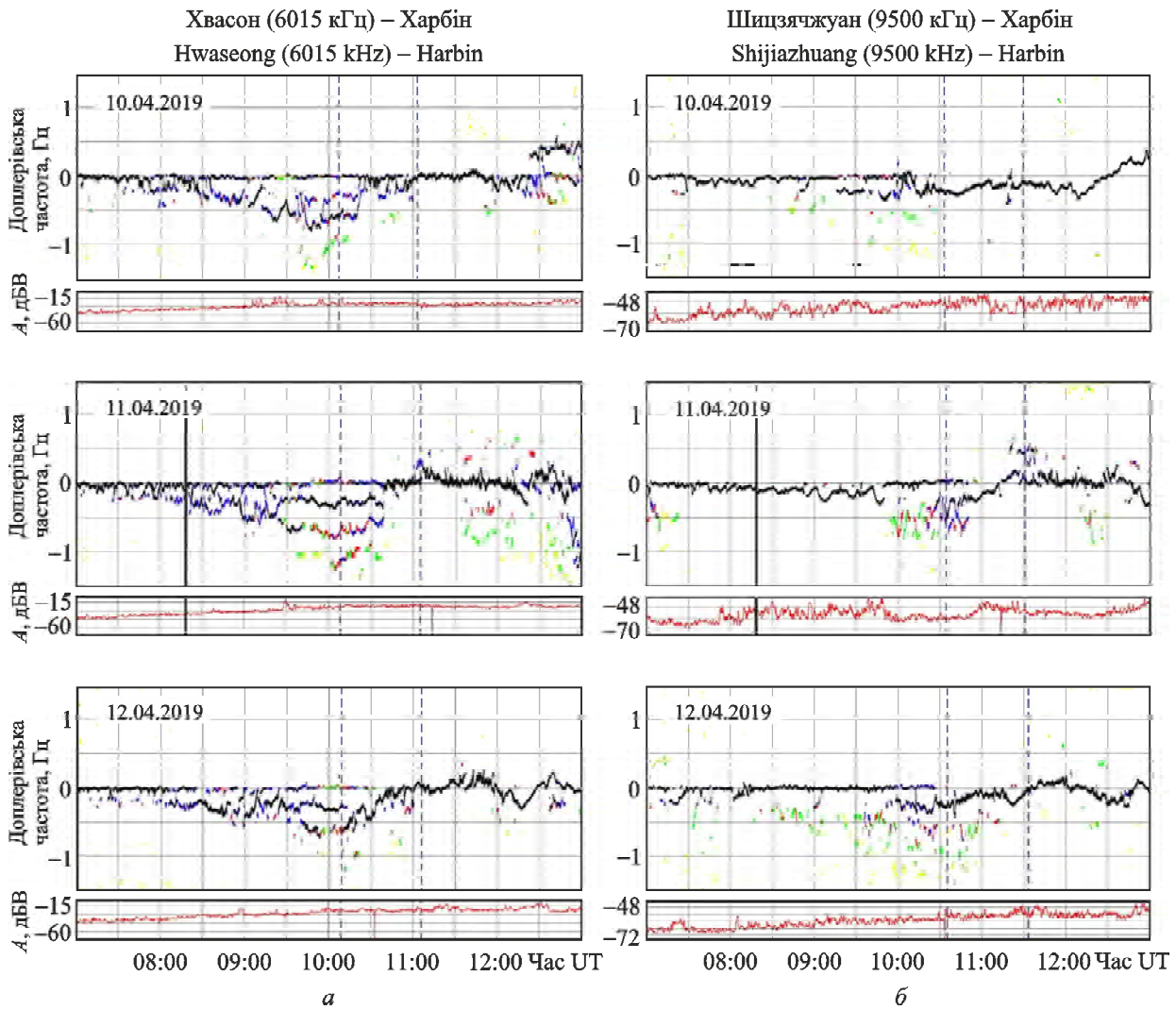


Рис. 3. Часові варіації доплерівських спектрів і амплітуди сигналу, зареєстрованого 10, 11 та 12 квітня 2019 р. на радіотрасах Хвасон–Харбін (Hwaseong–Harbin) (а) та Шицзячжуан–Харбін (Shijiazhuang–Harbin) (б)

$$v = \frac{D}{\Delta t - \Delta t_0}, \quad (1)$$

де Δt_0 – час поширення збурення від епіцентру до висоти, яка дорівнює висоті відбиття z_r радіохвилі на даній радіотрасі. За значеннями v і T визначалися можливі типи хвиль, відповідальні за перенесення збурень.

Наприклад, для землетрусу, що мав місце 5 вересня 2018 р., на радіотрасах Хвасон–Харбін і Коян–Харбін часи запізнення передбачуваної реакції $\Delta t_1 = 12$ хв і $\Delta t_2 = 48$ хв. При $\Delta t_0 = 5$ хв зі співвідношення (1) маємо $v_1 \approx 3$ км/с та $v_2 \approx 0.5$ км/с. Такі швидкості властиві сейсмічним і акустико-гравітаційним хвилям [43]. Додамо, що сейсмічні хвилі поширюються в літо-

сфері уздовж поверхні Землі. При цьому вони викликають атмосферні хвилі, які досягають іоносфери. Таким чином, сейсмічні хвилі є тільки посередником при поширенні збурень.

Для розглянутих землетрусів загальними закономірностями в варіаціях доплерівських спектрів є наступні:

- 1) істотне розширення (до 2 Гц) доплерівських спектрів, посилення багатомодовості;
- 2) аперіодичні та квазіперіодичні варіації доплерівського зміщення частоти;
- 3) близькість удаваних швидкостей (≈ 3 та $0.3 \div 1.0$ км/с).

За значеннями амплітуди f_{Da} і періоду T оцінювалася відносна амплітуда збурень концентрації

електронів δ_{Na} . При цьому використовувалося наступне наближене співвідношення [39]:

$$\delta_{Na} = k^2 \frac{cT}{8\pi H} \frac{(R^2 + z_r^2)^{1/2}}{z_r} \frac{f_{Da}}{f}, \quad (2)$$

де

$$k^2 = \left(1 + \frac{R^2}{2r_0 z_r}\right)^{-1}, \quad (3)$$

c – швидкість світла у вакуумі, H – висота однорідної атмосфери, $r_0 \approx 6380$ км – середній радіус Землі.

Оцінки за співвідношенням (2), яке, зокрема, не описує вплив рефракції радіохвилі, з урахуванням (3), наприклад, для 5 вересня 2018 р. і радіотраси Хвасон–Харбін дають $\delta_{Na} \approx 1.5 \div 3\%$ при $f_{Da} = 0.05 \div 0.10$ Гц і $T = 3$ хв і $\delta_{Na} \approx 6.0 \div 7.5\%$ при $f_{Da} = 0.20 \div 0.25$ Гц і $T = 30$ хв.

Результати аналогічних оцінок для інших землетрусів наведені в табл. 5.

Таким чином, є підстави припускати, що описані збурення дійсно викликані землетрусами.

7. Основні результати

1. Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях щонайменше $1 \div 2$ тис. км від епіцентру, посиленням багатомодовості та значним уширенням доплерівських спектрів. Були виявлені також хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період $4 \div 5$ хв), які генеруються сейсмічною хвилею (швидкість ≈ 3 км/с). Відносна амплітуда δ_{Na} квазіперіодичних варіацій концентрації електронів N при цьому становила $4.5 \div 9\%$. Тривалість цугу коливань була в межах $24 \div 55$ хв. Відносна амплітуда δ_{Na} варіацій кон-

центрації електронів з періодом $T \approx 15 \div 30$ хв, викликаних поширенням атмосферної гравітаційної хвилі, становила $30 \div 55\%$. Тривалість хвильового цугу досягала приблизно 100 хв, швидкість – близько 0.3 км/с.

2. Виявлено, що характер варіацій доплерівських спектрів, доплерівського зміщення частоти основної моди й амплітуди сигналу в день землетрусу в Японії 5 вересня 2018 р. і в контрольні дні помітно відрізнявся. Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень: 3 км/с та ≈ 500 м/с. Перша швидкість близька до швидкості сейсмічних хвиль, а друга – до швидкості атмосферних гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. Відносна амплітуда δ_{Na} в полі інфразвукової хвилі й атмосферної гравітаційної хвилі була $\approx 1.5 \div 3\%$ та $6 \div 7.5\%$ відповідно.

3. Землетрус 11 квітня 2019 р. супроводжувався уширенням доплерівських спектрів на $1 \div 1.5$ Гц в діапазоні частот $5 \div 9.8$ МГц, генерацією атмосферної гравітаційної хвилі зі швидкістю $0.5 \div 1$ км/с і періодом $8 \div 20$ хв і генерацією інфразвукової хвилі з періодом $2 \div 5$ хв та зі швидкістю $0.3 \div 0.4$ км/с.

4. Значні варіації амплітуди сигналу спостерігалися не на всіх радіотрасах і не при всіх землетрусах.

5. Спільними рисами реакції іоносфери на помірні землетруси є наступні: істотне уширення доплерівських спектрів, посилення багатомодовості, аперіодичні та квазіперіодичні варіації доплерівського зміщення частоти. Останні пов'язані з генерацією землетрусами сейсмічних і акустико-гравітаційних хвиль.

Робота виконана в межах Договору про наукову співпрацю між Харківським національним університетом імені В. Н. Каразіна та Харбінським інженерним університетом. Робота Л. Ф. Черногора та К. П. Гармаша частково підтримувалася фінансуванням держбюджетної НДР установ МОН України (номери держреєстрації 0119U002538 та 0118U002039 відповідно), робота Q. Guo та Y. Zheng – Central University Basic Research Business Expenses Special Fund Project (Спеціальним фондом фінансування Проекту з фундаментальних досліджень Центрального університету, КНР) (номери грантів HEUCFG201832 та HEUCFP201840), Heilongjiang Province Applied Technology Research and Development Program National Project Provincial

Таблиця 5. Основні параметри хвильових збурень, пов'язаних із землетрусами

Дата	f_{Da} , Гц	T , хв	δ_{Na} , %	ΔT , хв
7 липня 2018 р.	0.10 \div 0.20	4 \div 5	4 \div 9	55
	0.25 \div 0.30	15 \div 30	30 \div 55	100
5 вересня 2018 р.	0.05 \div 0.10	3	1.5 \div 3	30
	0.20 \div 0.25	30	6 \div 7.5	150
11 квітня 2019 р.	0.10 \div 0.12	15	25 \div 30	60

Fund (Фондом провінції Хейлунцзян фінансування національних проєктів з Програми прикладних технологій та досліджень, КНР) (номер гранту GX16A007) та Open Fund for National Key Laboratory of Deep-Sea Manned Equipment (Відкритим фондом Національної провідної лабораторії глибоководного обладнання, КНР) (номер гранту 702SKL2017200).

Graduate student Luo Yiyang thanks for the financial support of the China Scholarship Council (CSC) program (201908100008).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.
2. Chernogor L. F. and Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* 2008. Vol. 13, Is. 2. P. 120–137.
3. Chernogor L. F. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.* 2011. Vol. 32, Is. 11. P. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
4. Pulnits S. A., Ouzounov D. P., Karelin A. V., and Davidenko D. V. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Geomagn. Aeron.* 2015. Vol. 55, Is. 4. P. 521–538. DOI: 10.1134/S0016793215040131
5. Bolt B. A. Seismic Air Waves from the Great 1964 Alaskan Earthquake. *Nature*. 1964. Vol. 202, Is. 4937. P. 1095–1096. DOI: 10.1038/2021095a0
6. Donn W. L. and Posmentier E. S. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *J. Geophys. Res.* 1964. Vol. 69, Is. 24. P. 5357–5361.
7. Davies K. and Baker D. M. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28. *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70, Is. 9. P. 2251–2253.
8. Row R. V. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28. *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71, Is. 1. P. 343–345.
9. Pavlov V. A. Effects of earthquakes and volcanic eruptions on the ionospheric plasma. *Radiophys. Quantum. Electron.* 1979. Vol. 22, Is. 1. P. 10–23. DOI: 10.1007/BF01035223
10. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Сорокин В. М., Федорович Г. Ф. О генерации геомагнитных вариаций акустическими колебаниями во время землетрясений. *Физика Земли*. 1979. № 3. С. 58–68.
11. Doil'nitsyna É. G., Drobyazko I. N., and Pavlov V. A. Influence of an earthquake on the electron concentration in the F layer of the ionosphere. *Radiophys. Quantum. Electron.* 1981. Vol. 24, Is. 7. P. 535–542. DOI: 10.1007/BF01034548
12. Павлов В. А. Акустический импульс над эпицентром землетрясения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986. Т. 26, № 5. С. 807–815.
13. Сурков В. В. *Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах*. Москва: Издательство МИФИ, 2000. 448 с.
14. Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., and Maruyama T. A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004. *Earth Planets Space*. 2007. Vol. 59. P. 1015–1026. DOI: 10.1186/BF03352042
15. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C.-V., and Liperovskaya E. V. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagn. Aeron.* 2008. Vol. 48, Is. 6. P. 795–806. DOI: 10.1134/S0016793208060133
16. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. *Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу*. Москва: Наука, 2008. 295 с.
17. Surkov V. and Hayakawa M. *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*. Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer Japan, 2014. 486 p.
18. Шарадзе З. С., Джапаридзе Г. А., Матиашвили Т. Г., Мосашвили Н. В. Сильные землетрясения и связанные с ними возмущения в ионосфере и геомагнитном поле. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1989. № 1. С. 20–32.
19. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Леус С. Г., Пахомова О. В., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф. Исследование реакции ионосферной плазмы на воздействие подземных, наземных, воздушных взрывов и землетрясений. *Физика космической плазмы. Сборник трудов Международного семинара*. Киев: НКА Украины, ГАО АН Украины, Киевский университет им. Тараса Шевченка, 1994. С. 151–160.
20. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. *Telecomm. Radio Eng.* 1999. Vol. 53, Is. 4–5. P. 6–20. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20
21. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation. *Telecomm. Radio Eng.* 1999. Vol. 53, Is. 6. P. 1–22. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i6.10
22. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околосферной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 7. С. 3–15.
23. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околосферной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 8. С. 3–19.
24. Baba K. and Hayakawa M. The Effect of Localized Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation

- on the Basis of the Finite Element Method. In: M. Haya-kawa, Y. Fujinawa, eds. *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Tokyo: Terra Sci. Publ. Comp., 1994. P. 399–407.
25. Calais E. and Minster J. B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 1995. Vol. 22, Is. 9. P. 1045–1048. DOI: 10.1029/95GL00168
 26. Calais E., and Bernard J. GPS, earthquake, the ionosphere, and Space Shuttle. *Phys. Earth Planet Inter.* 1998. Vol. 105, Is. 3-4. P. 167–181. DOI: 10.1016/S0031-9201(97)00089-7
 27. Garcia R., Crespon F., Ducic V., and Lognonné P. Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data. *Geophys. J. Int.* 2005. Vol. 163, Is. 3. P. 1049–1064. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02775.x
 28. Heki K. and Ping J. Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 236, Is. 3-4. P. 845–855. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.06.010
 29. Fedorenko A. K., Lizunov G. V., and Rothkaehl H. Satellite observations of quasi-wave atmospheric disturbances at heights of the F region caused by powerful earthquakes. *Geomagn. Aeron.* 2005. Vol. 45, Is. 3. P. 380–387.
 30. Afraimovich E. L., Astafieva E. I., and Kirushkin V. V. Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2006. Vol. 6, Is 2. id. GI2002. DOI: 10.1029/2004GI000092
 31. Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., Hemmakorn N., Komolmis T., and Maruyama T. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, Is. B9. id. B09313. DOI: 10.1029/2005JB004202
 32. Liu J. Y., Tsai Y. B., Chen S. W., Lee C. P., Chen Y. C., Yen H. Y., Chang W. Y., and Liu C. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004. *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33, Is. 2. id. L02103. DOI: 10.1029/2005GL023963
 33. Astafyeva E. I. and Afraimovich E. L. Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004. *Earth Planets Space.* 2006. Vol. 58, Is. 8. P. 1025–1031. DOI: 10.1186/BF03352607
 34. Afraimovich E. L., Ding F., Kiryushkin V. V., Astafyeva E. I., Jin S., and Sankov V. A. TEC response to the 2008 Wenchuan Earthquake in comparison with other strong earthquakes. *Int. J. Remote Sens.* 2010. Vol. 31, Is. 13. P. 3601–3613. DOI: 10.1080/01431161003727747
 35. Kiryushkin V. V., Afraimovich E. L., and Astafyeva E. I. Evolution of seismo-ionospheric disturbances according to the data of dense network of GPS stations. *Cosm. Res.* 2011. Vol. 49, Is. 3. id. 227. DOI: 10.1134/S0010952511020043
 36. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., and Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space.* 2011. Vol. 63, Is. 7. P. 853–857. DOI: 10.5047/eps.2011.06.020
 37. Liu J. Y., Chen C. H., Sun Y. Y., Chen C. H., Tsai H. F., Yen H. Y., Chum J., Laštovička J., Yang Q. S., Chen W. S., and Wen S. The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43, Is. 4. P. 1759–1765. DOI: 10.1002/2015GL067487
 38. Heki K. Ionospheric disturbances related to Earthquakes. In: C. Huang, G. Lu, Zhang Y., and Paxton L. J., eds. *Space Physics and Aeronomy. Volume 3: Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges*. Wiley, 2020.
 39. 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. Sol.-Terr. Phys.* 2019. Vol. 186. P. 88–103. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.003
 40. 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, Is. 2. id. e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866
 41. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., and Zheng Yu. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Adv. Space Res.* 2020. Vol. 66, Is. 2. P. 226–242. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.037
 42. Marple Jr., S. L. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1987. 492 p.
 43. Davies K. *Ionospheric radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580 p.

REFERENCES

1. CHERNOGOR, L. F., 2003. Physics of Earth, Atmosphere, and Geospace from the Standpoint of System Paradigm. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 8, is. 1, pp. 59–106. (in Russian).
2. CHERNOGOR, L. F. and ROZUMENKO, V. T., 2008. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 13, is. 2, pp. 120–37.
3. CHERNOGOR, L. F., 2011. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.* vol. 32, is. 11, pp. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
4. PULINETS, S. A., OUZOUNOV, D. P., KARELIN, A. V. and DAVIDENKO, D. V., 2015. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Geomagn. Aeron.* vol. 55, is. 4, pp. 521–538. DOI: 10.1134/S0016793215040131.
5. BOLT, B. A., 1964. Seismic Air Waves from the Great 1964 Alaskan Earthquake. *Nature.* vol. 202, is. 4937, pp. 1095–1096. DOI: 10.1038/2021095a0
6. DONN, W. L. and POSMENTIER, E. S., 1964. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *J. Geophys. Res.* vol. 69, is. 24, pp. 5357–5361.

7. DAVIES, K. and BAKER, D. M., 1965. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28. *J. Geophys. Res.* vol. 70, is. 9, pp. 2251–2253.
8. ROW, R. V., 1966. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28. *J. Geophys. Res.* vol. 71, is. 1, pp. 343–345.
9. PAVLOV, V. A., 1979. Effects of earthquakes and volcanic eruptions on the ionospheric plasma. *Radiophys. Quantum. Electron.* vol. 22, is. 1, pp. 10–23. DOI: 10.1007/BF01035223
10. AL'PEROVICH, L. S., GOKHBERG, M. B., SOROKIN, V. M. and FEDOROVICH, G. V., 1979. On generation of geomagnetic variations by acoustic oscillations during earthquakes. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli.* no. 3, pp. 58–68. (in Russian).
11. DOIL'NITSYNA, É. G., DROBYAZKO, I. N. and PAVLOV, V. A., 1981. Influence of an earthquake on the electron concentration in the F layer of the ionosphere. *Radiophys. Quantum. Electron.* vol. 24, is. 7, pp. 535–542. DOI: 10.1007/BF01034548
12. PAVLOV, V. A., 1986. Acoustic pulse above the earthquake epicenter. *Geomagn. Aeron.* vol. 26, no. 5, pp. 807–815. (in Russian).
13. SURKOV, V. V., 2000. *Electromagnetic effects caused by earthquakes and explosions.* Moscow: MEPhI Press. (in Russian).
14. SHINAGAWA, H., IYEMORI, T., SAITO, S. and MARIYAMA, T., 2007. A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004. *Earth Planets Space.* vol. 59, pp. 1015–1026. DOI: 10.1186/BF03352042
15. LIPEROVSKY, V. A., POKHOTILOV, O. A., MEISTER, C.-V. and LIPEROVSKAYA, E. V., 2008. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagn. Aeron.* vol. 48, is. 6, pp. 795–806. DOI: 10.1134/S0016793208060133
16. GOKHBERG, M. B. and SHALIMOV, S. L., 2008. *The Impact of Earthquakes and Explosions on the Ionosphere.* Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
17. SURKOV, V. and HAYAKAWA, M., 2014. *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields.* Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer Japan.
18. SHARADZE, Z. S., DZHAPARIDZE, G. A., MATIASHVILI, T. G. and MOSASHVILI, N. V., 1989. Strong earthquakes and their connection with perturbations in the ionosphere and geomagnetic field. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli.* no. 1, pp. 20–32. (in Russian).
19. GARMASH, K. P., GRITCHIN, A. I., LEUS, S. G., PAKHOMOVA, O. V., POHIL'KO, S. N. and CHERNOGOR, L. F., 1994. Ionospheric plasma effect investigation on underground, ground and air explosions and earthquakes. In: *Space Plasma Physics. Proceedings of International Workshop.* Kyv: State Space Agency of Ukraine, Main Astronomic Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, T. G. Shevchenko Kyiv National University Publ., pp. 151–160. (in Russian).
20. GARMASH, K. P., GOKOV, A. M., KOSTROV, L. S., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., FEDORENKO, Y. P., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1999. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. *Telecomm. Radio Eng.* vol. 53, is. 4-5, pp. 6–20. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20
21. GARMASH, K. P., GOKOV, A. M., KOSTROV, L. S., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., FEDORENKO, Y. P., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1999. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation. *Telecomm. Radio Eng.* vol. 53, is. 6, pp. 1–22. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i6.10
22. GARMASH, K. P., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1999. Radio-propagation studies of the processes acting in the near-Earth plasma disturbed by high-energy sources. Part 1. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* no. 7, pp. 3–15. (in Russian).
23. GARMASH, K. P., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1999. Radio-propagation studies of the processes acting in the near-Earth plasma disturbed by high-energy sources. Part 2. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* no. 8, pp. 3–19. (in Russian).
24. BABA, K. and HAYAKAWA, M., 1994. The Effect of Localized Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation on the Basis of the Finite Element Method. In: M. HAYAKAWA and Y. FUJINAWA, eds. *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction.* Tokyo: Terra Sci. Publ. Comp., pp. 399–407.
25. CALAIS, E. and MINSTER, J. B., 1995. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophys. Res. Lett.* vol. 22, is. 9, pp. 1045–1048. DOI: 10.1029/95GL00168
26. CALAIS, E. and BERNARD, J., 1998. GPS, Earthquake, the ionosphere, and Space Shuttle. *Phys. Earth Planet Inter.* vol. 105, is. 3-4, pp. 167–181. DOI: 10.1016/S0031-9201(97)00089-7
27. GARCIA, R., CRESPO, F., DUCIC, V. and LOGNONNÉ, P., 2005. Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data. *Geophys. J. Int.* vol. 163, is. 3, pp. 1049–1064. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02775.x
28. HEKI, K. and PING, J., 2005. Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array. *Earth Planet. Sci. Lett.* vol. 236, is. 3-4, pp. 845–855. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.06.010
29. FEDORENKO, A. K., LIZUNOV, G. V. and ROTHKAEHL, H., 2005. Satellite observations of quasi-wave atmospheric disturbances at heights of the F region caused by powerful earthquakes. *Geomagn. Aeron.* vol. 45, is. 3, pp. 380–387.
30. AFRAIMOVICH, E. L., ASTAFIEVA, E. I. and KIRUSHKIN, V. V., 2006. Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake. *Int. J. Geomagn. Aeron.* vol. 6, is. 2, id. GI2002. DOI: 10.1029/2004GI000092

31. HEKI, K., OTSUKA, Y., CHOOSAKUL, N., HEMMAKORN, N., KOMOLMIS, T. and MARUYAMA, T., 2006. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* vol. 111, is. B9, id. B09313. DOI: 10.1029/2005JB004202
32. LIU, J. Y., TSAI, Y. B., CHEN, S. W., LEE, C. P., CHEN, Y. C., YEN, H. Y., CHANG, W. Y. and LIU, C., 2006. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004. *Geophys. Res. Lett.* vol. 33, is. 2, id. L02103. DOI:10.1029/2005GL023963
33. ASTAFYEVA, E. I. and AFRAIMOVICH, E. L., 2006. Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004. *Earth Planets Space.* vol. 58, is. 8, pp. 1025–1031. DOI: 10.1186/BF03352607
34. AFRAIMOVICH, E. L., DING, F., KIRYUSHKIN, V. V., ASTAFYEVA, E. I., JIN S. and SANKOV, V. A., 2010. TEC Response to the 2008 Wenchuan Earthquake in comparison with other strong earthquakes. *Int. J. Remote Sens.* vol. 31, is. 13, pp. 3601–3613. DOI: 10.1080/01431161003727747
35. KIRYUSHKIN, V. V., AFRAIMOVICH, E. L. and ASTAFYEVA, E. I., 2011. Evolution of seismo-ionospheric disturbances according to the data of dense network of GPS stations. *Cosm. Res.* vol. 49, is. 3, id. 227. DOI: 10.1134/S0010952511020043
36. ROLLAND, L. M., LOGNONNÉ, P., ASTAFYEVA, E., KHERANI, E. A., KOBAYASHI, N., MANN, M. and MUNEKANE, H., 2011. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Earth Planets Space.* vol. 63, is. 7, pp. 853–857. DOI: 10.5047/eps.2011.06.020
37. LIU, J. Y., CHEN, C. H., SUN, Y. Y., CHEN, C. H., TSAI, H. F., YEN, H. Y., CHUM, J., LAŠTOVIČKA, J., YANG, Q. S., CHEN, W. S. and WEN, S., 2016. The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan. *Geophys. Res. Lett.* vol. 43, is. 4, pp. 1759–1765. DOI: 10.1002/2015GL067487
38. HEKI, K., 2020. Ionospheric disturbances related to Earthquakes. In: C. HUANG, G. LU, Y. ZHANG, and L. J. PAXTON, eds. *Space Physics and Aeronomy. Volume 3: Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges.* Wiley.
39. 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. Sol.-Terr. Phys.* vol. 186, pp. 88–103. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.003
40. 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.* vol. 55, is. 2, id. e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866
41. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q., LUO, Y., ROZUMENKO, V. T. and ZHENG, Y., 2020. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Adv. Space Res.* vol. 66, is. 2, pp. 226–242. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.037
42. MARPLE JR., S. L., 1987. *Digital spectral analysis: with applications.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.
43. DAVIES, K., 1990. *Ionospheric radio.* London: Peter Peregrinus Ltd.
- Y. Luo¹, L. F. Chernogor¹, K. P. Garmash¹, Q. Guo², and Yu. Zheng³
- ¹V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61002, Ukraine
- ²Harbin Engineering University, 145-1, Nantong St., Nangang District, 150001 Harbin, Heilongjiang, China
- ³Qingdao University, 08, Ningxia Road, 266071 Qingdao, Shandong, China

SEISMIC-IONOSPHERIC EFFECTS: RESULTS OF RADIO SOUNDINGS AT OBLIQUE INCIDENCE

Purpose: The object of the radio study is to investigate dynamic processes, which occurred over the People's Republic of China following three moderate (magnitudes 5.9–6.6) earthquakes in Japan in 2018–2019. The distances between the earthquake epicenters and the radio paths midpoints varied from approximately 1300 to 2000 km. The aim of the study is to present observations of the dynamic processes in the ionosphere, which accompanied the earthquakes in Japan, and the analysis of inter-comparison between the events.

Design/methodology/approach: To continuously observe the ionosphere state over the ~100–300-km altitude range, the multi-frequency multiple path radio system for oblique incidence soundings of the ionosphere has been designed by the specialists at the V. N. Karazin National University (Ukraine) and the Harbin Engineering University, PRC (45.78 N, 126.68 E). The basic premise upon which the system operation is based are the measurements of the Doppler shift of frequency, f_D , and of the amplitude of radio waves reflected from the ionosphere. The Doppler spectra are calculated over the 20-s intervals, with the Doppler resolution of 0.02 Hz and the time resolution of 7.5 s.

Findings: The seismic activity in Japan on July 7, 2018 was accompanied by an increase in a number of rays, by a significant broadening of the Doppler spectra, and by aperiodic processes in the ionosphere at distances no less than 1000–2000 km from the earthquake epicenters. Also, wave disturbances, generated by the seismic waves (speeds of ≈ 3 km/s), have been revealed in the 4–5-min infrasonic period range; the amplitude, δ_N , of the quasi-periodic variations in the electron density, N , was observed to be 4.5–9%, and the duration of the oscillation trains to vary in the 24–55-min range. The relative amplitude δ_{Na} of the electron concentration variations with the period ≈ 15 –30 min caused by the propagation of atmospheric gravity wave (AGW) was estimated to be 30–55%, the oscillation train duration was observed to be approximately 100 min, and the speed 0.3 km/s. The character of the Doppler spectrum variations, the Doppler shift of frequency over the main ray, and of the signal amplitude were found to be notably different

during the September 5, 2018 earthquake and on the reference days. Two characteristic apparent speeds of 3.3 km/s and of ≈ 500 m/s were revealed. The former is close to that of seismic waves, and the latter to the speed of AGWs in the terrestrial ionosphere. The relative amplitudes in the infrasonic and AGW wave fields were estimated to be $\delta_N \approx 1.5-3\%$ and $\delta_{Na} \approx 6-7.5\%$, respectively. The April 11, 2019 earthquake was accompanied by the Doppler spectrum broadening by 1–1.5 Hz in the 5–9.8 MHz frequency range, the generation of AGWs with 0.5–1 -km/s speeds and 8–20 -min periods, and by the generation of infrasonic waves with 2–5 -min periods and 0.3–0.4 -km/s speeds.

Conclusions: Moderate earthquakes of Richter magnitudes ≈ 6 have been determined to give rise to dynamic processes in the ionosphere at distances no less than 1000–2000 km. The disturbances are transported by seismic waves with ≈ 3 km/s speeds and by acoustic and atmospheric gravity waves with 0.3–1 km/s speeds and periods varying from units to tens of minutes.

Key words: earthquake, oblique incidence ionospheric sounding, Doppler spectrum, aperiodic and quasi-periodic disturbances, seismic wave, acoustic and atmospheric gravity waves

Стаття надійшла до редакції 10.06.2020