

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>

УДК 530.388

## ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОВОЛН ВЧ ДИАПАЗОНА НАД КИТАЕМ, СОПРОВОЖДАВШИЕ УМЕРЕННОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ЯПОНИИ 5 СЕНТЯБРЯ 2018 г.

Y. Luo<sup>1</sup>, Q. Guo<sup>2</sup>, Y. Zheng<sup>3</sup>, К. П. Гармаш<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, С. Н. Шульга<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4E-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com)<sup>2</sup>Harbin Engineering University, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, ChinaE-mail: [guoqiang@hrbeu.edu.cn](mailto:guoqiang@hrbeu.edu.cn)<sup>3</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, ChinaE-mail: [zhengyu@qdu.edu.cn](mailto:zhengyu@qdu.edu.cn)

**Актуальность.** Земля (внутренние оболочки) – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) образуют единую систему, которая является открытой, динамической и нелинейной. Между подсистемами в системе ЗАИМ существуют прямые и обратные, положительные и отрицательные связи, которые в настоящее время изучены недостаточно. Взаимодействие подсистем активизируется при срабатывании в одной из них мощного источника энерговыделения. В работе в качестве такого источника рассматривается умеренное (магнитуда  $M \approx 6.6$ ) землетрясение.

**Целью** работы является описание временных вариаций характеристик радиоволн ВЧ диапазона на радиотрассах над Китаем, сопровождавших японское землетрясение 5 сентября 2018 г.

**Методы и методология.** Для наблюдения за временными вариациями характеристик радиоволн использовался многочастотный многотрассовый когерентный радиотехнический комплекс Харбинского инженерного университета. В качестве радиопередающих средств задействованы широкоэмиттерные радиостанции, размещенные на территории Китая, Южной Кореи, Японии, России и Монголии. Анализу подлежали временные вариации доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты основной моды и амплитуды сигнала. Измерения выполнены для 14 радиотрасс протяженностью от ~900 до 1800 км различной ориентации в диапазоне частот 5 – 10 МГц. Разрешающая способность по доплеровской частоте равна 0.02 Гц, а по времени – 7.5 с.

**Результаты.** Обнаружена и изучена реакция ионосферы на умеренное землетрясение. Оценены время запаздывания предполагаемой реакции и кажущаяся скорость распространения возмущений. Продемонстрировано, что после сейсмического удара доплеровские спектры становятся диффузными, а доплеровское смещение частоты основной моды изменяется во времени по квазипериодическому закону с периодом инфразвука (около 3 мин) и периодом атмосферной гравитационной волны (около 20 – 30 мин).

**Выводы.** Умеренные землетрясения способны приводить к регистрируемым возмущениям в ионосфере на расстояниях ~1000 км от эпицентра сейсмического удара.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** землетрясение, ионосфера, многочастотный многотрассовый когерентный радиотехнический комплекс, доплеровские спектры, доплеровское смещение частоты, амплитуда сигнала, квазипериодические возмущения

## ВАРІАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОХВИЛЬ ВЧ ДІАПАЗОНУ НАД КИТАЄМ, ЯКІ СУПРОВОДЖУВАЛИ ПОМІРНИЙ ЗЕМЛЕТРУС В ЯПОНІЇ 5 ВЕРЕСНЯ 2018 р.

Y. Luo<sup>1</sup>, Q. Guo<sup>2</sup>, Y. Zheng<sup>3</sup>, К. П. Гармаш<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, С. Н. Шульга<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна, 61022, Харків, пл. Свободи, 4<sup>2</sup>Harbin Engineering University, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, China<sup>3</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, China

**Актуальність.** Земля (внутрішні оболонки) – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) утворюють єдину систему, яка є відкритою, динамічною та нелінійною. Між підсистемами в системі ЗАІМ існують прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки, які на цей час вивчено недостатньо. Взаємодія підсистем активізується при спрацюванні в одній з них потужного джерела енерговиділення. У роботі в якості такого джерела розглядається помірний (магнітуда  $M \approx 6.6$ ) землетрус.

**Метою** даної роботи є опис часових варіацій характеристик радіохвиль ВЧ діапазону на радіотрасах над Китаєм, супроводжуваних японським землетрусом 5 вересня 2018 р.

**Методи та методологія.** Для спостереження за часовими варіаціями характеристик радіохвиль використовувався багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний комплекс Харбінського інженерного університету. В якості радіопередавальних засобів задіяні широкомовні радіостанції, розміщені на території Китаю, Південної Кореї, Японії, Росії та Монголії. Аналізу підлягали часові варіації доплерівських спектрів, доплерівського зсуву частоти основної моди й амплітуди сигналу. Вимірювання виконані для 14 радіотрас довжиною від ~900 до 1800 км різної орієнтації в діапазоні частот 5 – 10 МГц. Роздільна здатність за доплерівською частотою дорівнює 0.02 Гц, а за часом – 7.5 с.

**Результати.** Виявлено та вивчено реакцію іоносфери на помірний землетрус. Оцінені час запізнення ймовірної реакції та вдавана швидкість поширення збурень. Продемонстровано, що після сейсмічного удару доплерівські спектри стають дифузними, а доплерівський зсув частоти основної моди змінюється з часом за квазіперіодичним законом з періодом інфразвуку (близько 3 хв) та періодом атмосферної гравітаційної хвилі (біля 20 – 30 хв).

**Висновки.** Помірні землетруси здатні призводити до ресструємих збурень в іоносфері на відстанях ~1000 км від епіцентру сейсмічного удару.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** землетрус, іоносфера, багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний комплекс, доплерівські спектри, доплерівський зсув частоти, амплітуда сигналу, квазіперіодичні збурення

## HF RADIO-WAVE CHARACTERISTIC VARIATIONS OVER CHINA DURING MODERATE EARTHQUAKE IN JAPAN ON SEPTEMBER 5, 2018

Y. Luo<sup>1</sup>, Q. Guo<sup>2</sup>, Y. Zheng<sup>3</sup>, K. P. Garmash<sup>1</sup>, L. F. Chernogor<sup>1</sup>, S. M. Shulga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>2</sup>Harbin Engineering University, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, China

<sup>3</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, China

**Urgency.** The Earth's interior layers – atmosphere – ionosphere – magnetosphere (EAIM) form a one system, which is open, dynamic, and nonlinear. There are direct and reverse, positive and negative linkages among the subsystems within the EAIM system, which are currently insufficiently studied. The release of energy from a high-power source in one of the subsystems triggers the interaction among the subsystems. In this paper, a moderate earthquake of Richter magnitude  $M \approx 6.6$  is considered as such a source.

**The aim** of the paper is to describe time variations in the characteristics of the HF radio waves observed along the radio propagation paths over the People's Republic of China during the earthquake of September 5, 2018 in Japan.

**Techniques and Methodology.** To observe the temporal variations in the characteristics of radio waves, we used the multi-frequency multiple-path coherent radio system at the Harbin Engineering University. Broadcasting stations located in the People's Republic of China, the South Korea, Japan, Russia, and Mongolia are used as transmitters. The time variations in the Doppler spectra, the Doppler shift of frequency of the main mode, and signal amplitudes were subjected to analysis. The measurements were performed in the frequency range of 5 – 10 MHz over 14 radio propagation paths extending from ~900 km to 1800 km and having various orientations. The Doppler spectra are calculated in 7.5-s step with the root-mean-square Doppler line error of 0.02 Hz.

**Results.** The response of the ionosphere to a moderate earthquake was observed and studied. The delay time of the assumed response and the apparent speed of propagation of the disturbances were estimated. It was demonstrated that the seismic shock was followed by Doppler spectra spreading and the Doppler frequency shift of the main mode varying with time quasi-periodically with an ~3-min period of infrasound and an ~20 – 30-min period of atmospheric gravity wave.

**Conclusions:** Moderate earthquakes are capable of launching disturbances in the ionosphere detectable at distances of ~1000 km from the epicenter of earthquake.

**KEY WORDS:** Earthquake, ionosphere, multi-frequency multiple-path coherent radio system, Doppler spectrum, Doppler shift of frequency, signal amplitude, quasi-periodic disturbance

## ВВЕДЕНИЕ

Земля (внутренние оболочки) – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) образуют единую систему, которая является открытой, динамической и нелинейной. Между подсистемами в системе ЗАИМ существуют прямые и обратные, положительные и отрицательные связи, которые в настоящее время изучены недостаточно. Взаимодействие подсистем активизируется при срабатывании в одной из подсистем мощного источника энерговыделения. В работе в качестве такого источника рассматривается умеренное (магнитуда  $M \approx 6.6$ ) землетрясение.

Реакция ионосферы на землетрясения отличается большим разнообразием. Она зависит от вариаций космической погоды, времени года и суток, определяющих состояние ионосферы, от места наблюдения, средств наблюдения, а также параметров землетрясения (его магнитуды, глубины, географических координат). Несмотря на многолетние исследования [1 – 38], актуальной задачей является исследование реакции ионосферы на любое достаточно сильное землетрясение.

**Целью** настоящей работы является анализ временных вариаций характеристик радиоволн высокочастотного (ВЧ) диапазона на радиотрассах Hwaseong – Harbin и Gouyang – Harbin над Китаем, сопровождавших умеренное землетрясение в Японии 5 сентября 2018 г.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Землетрясение магнитудой  $M \approx 6.6$  произошло в Японии 5 сентября 2018 г. в 18:07:59 (здесь и далее всемирное время). Глубина эпицентра – 35 км. Его координаты: 42.686°N, 141.929°E. Сейсмический удар имел место за 1 – 2 часа до восхода Солнца на высотах ионосферы. При этом реакции на землетрясение и движение солнечного терминатора могли накладываться.

### СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

**Методы и методология.** Для наблюдения за временными вариациями характеристик радиоволн использовался многочастотный многотрассовый когерентный радиотехнический комплекс Харбинского инженерного университета, описанный в работах [39–45]. В качестве радиопередающих средств задействованы широкоэвещательные радиостанции, размещенные на территории Китая, Южной Кореи, Японии, России и Монголии.

Программно-аппаратный комплекс наклонного зондирования ионосферы, разработанный специалистами Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина и Харбинского инженерного университета, расположен в Китае на территории Харбинского инженерного университета (43.78°N, 126.68°E).

Программно-аппаратный комплекс располагает оригинальным программным обеспечением.

Аналізу подлежали временные вариации доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты основной моды и амплитуды сигнала. Измерения выполнены для 14 радиотрасс протяженностью от ~900 до 1800 км различной ориентации в диапазоне частот 5 – 10 МГц (см. Таблицу). Разрешающая способность по доплеровской частоте равна 0.02 Гц, а по времени – 7.5 с.

Высокое частотно-временное разрешение достигнуто благодаря применению авторегрессионной техники спектрального оценивания [46].

Таблица. Основные сведения о радиотрассах (по материалам <https://fmscan.org/index.php>)

| Частота, кГц | Координаты передатчика | Место-расположение (страна)     | Расстояние до Харбина, км | Координаты середины трассы |
|--------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 5000         | 34.95°N, 109.56°E      | Lintong/Pucheng (Китай)         | 1875                      | 40.37°N, 118.12°E          |
| 6015         | 37.21°N, 126.78°E      | Hwaseong (Корея)                | 950                       | 41.50°N, 126.73°E          |
| 6055         | 35.47°N, 140.21°E      | Chiba/Nagara (Япония)           | 1610                      | 40.63°N, 133.45°E          |
| 6080         | 49.18°N, 119.72°E      | Hailar/Nanmen (Китай)           | 645                       | 47.48°N, 123.2°E           |
| 6175         | 39.75°N, 116.81°E      | Beijing (Китай)                 | 1050                      | 42.77°N, 121.75°E          |
| 6600         | 37.60°N, 126.85°E      | Goyang (Корея)                  | 910                       | 41.69°N, 126.77°E          |
| 7260         | 47.80°N, 107.17°E      | Ulaanbaatar/Khonkhor (Монголия) | 1496                      | 46.79°N, 116.93°E          |
| 7295         | 62.24°N, 129.81°E      | Yakutsk (Россия)                | 1845                      | 54.01°N, 128.25°E          |
| 7345         | 62.24°N, 129.81°E      | Yakutsk (Россия)                | 1845                      | 54.01°N, 128.25°E          |
| 9500         | 38.47°N, 114.13°E      | Shijiazhuang (Китай)            | 1310                      | 42.13°N, 120.41°E          |
| 9520         | 40.72°N, 111.55°E      | Hohhot (Китай)                  | 1340                      | 43.25°N, 119.12°E          |
| 9675         | 39.75°N, 116.81°E      | Beijing (Китай)                 | 1050                      | 42.77°N, 121.75°E          |
| 9750         | 36.17°N, 139.82°E      | Yamata (Япония)                 | 1570                      | 40.98°N, 133.25°E          |
| 9830         | 39.75°N, 116.81°E      | Beijing (Китай)                 | 1050                      | 42.77°N, 121.75°E          |

### СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Для выделения эффектов землетрясения необходим тщательный анализ состояния космической погоды.

В ночь с 3 на 4 и с 6 на 7 сентября 2018 г. концентрация  $n_{sw}$  частиц в солнечном ветре увеличивалась от  $5 \cdot 10^6$  до  $25 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  (Рис. 1). 5 и 7 сентября 2018 г. наблюдалось увеличение скорости  $V_{sw}$  частиц от ~400 до ~490 км/с. Рост температуры частиц имел место 5 и 7 сентября 2018 г. от  $0.5 \cdot 10^5$  до  $2.6 \cdot 10^5$  К. Увеличение  $n_{sw}$  и  $V_{sw}$  привело к увеличению динамического давления от 1.5 – 2.5 до 6.6 нПа.

Азимутальная  $B_y$  и вертикальная  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля флуктуировали в пределах от –6.9 до 5.9 нТл и от –4.4 до 9.4 нТл соответственно. 4, 5 и 7 сентября 2018 г. имели место всплески значений функции Акасофу (мощности, поступающей в магнитосферу от солнечного ветра), достигающие 4.5 – 5.7 ГДж/с. Как результат, 4, 5 и 7 сентября 2018 г. наблюдались относительно небольшие магнитные возмущения. Индекс  $K_p$  изменялся от 2 до 3.3, а  $D_{st}$ -индекс варьировался от –23 до 21 нТл.

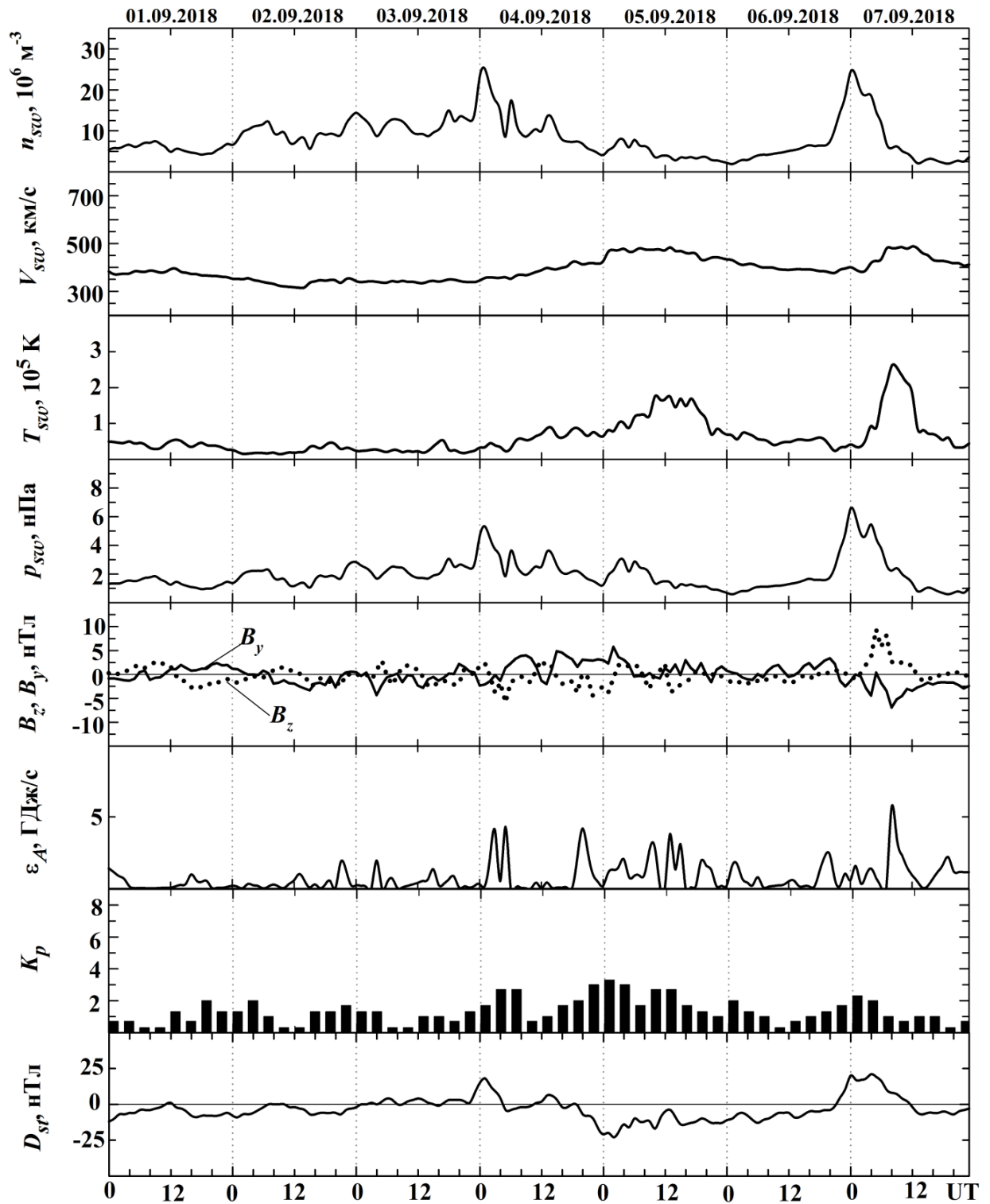


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: измеренные концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (по данным сайта [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/)) и рассчитанного динамического давления  $P_{sw}$ , измеренные компоненты  $B_z$  и  $B_y$  межпланетного магнитного поля (по данным спутника ACE); рассчитанные значения энергии  $\epsilon_A$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени,  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -индекса (по данным сайта <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/>) в период 1 – 7 сентября 2018 г. Даты указаны вдоль оси абсцисс.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Приведем в качестве примера результаты наблюдений за временными вариациями доплеровских спектров для двух радиотрасс, наиболее близко расположенных по отношению к эпицентру землетрясения.

**Радиотрасса Hwaseong – Harbin.** Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 6015 кГц, дислоцировано в Южной Корее. При этом длина радиотрассы вдоль земной поверхности  $R \approx 949$  км, расстояние от эпицентра до середины радиотрассы  $D \approx 1279$  км.

Временные зависимости доплеровских спектров (доплерограмм) для 4, 5 и 6 сентября 2018 г. приведены на Рис. 2. Сутки 4 и 6 сентября 2018 г. использовались в качестве контрольных.

В контрольные дни с 17:00 до 19:30 доплеровское смещение частоты  $f_D(t) \approx 0$  Гц. 4 сентября 2018 г. эпизодически появлялась и вторая, более слабая, мода. В контрольные дни после восхода Солнца на высотах ионосферы  $f_D(t)$  резко увеличилось до 0.7 – 0.8 Гц, а затем постепенно, флуктуируя, убывало до 0 Гц.

В день землетрясения поведение  $f_D(t)$  было иным. До 17:50  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Кроме того, в интервале времени 17:20 – 18:00 наблюдалась вторая, более слабая, мода. В 17:50  $f_D(t)$  основной моды резко увеличилось от 0 до 0.20 – 0.25 Гц. Далее наметилась тенденция к ее уменьшению. Первое изменение характера вариаций  $f_D(t)$  имело место около 18:20, второе – около 18:56. Далее наблюдались квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с периодом  $T$  около 30 мин, амплитудой  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц и длительностью около 150 мин. Кроме того, отмечались слабые ( $f_{Da} \approx 0.05 - 0.10$  Гц) квазипериодические вариации с  $T \approx 3$  мин.

В день землетрясения с 18:30 до 19:30 имели место значительные (до 30 дБ) вариации амплитуды сигнала, отсутствующие в контрольные дни.

**Радиотрасса Goyang – Harbin.** Радиостанция, излучающая на частоте 6600 кГц, расположена также в Южной Корее. При этом  $R \approx 907$  км, а  $D \approx 1272$  км.

Временные зависимости доплеровских спектров для контрольных дней и дня с землетрясением показаны на Рис. 3. Из Рис. 3 видно, что в контрольные дни до 20:30 – 21:00  $f_D(t) \approx 0$  Гц. После указанного времени наблюдались значительные вариации доплерограмм.

В день землетрясения примерно в 18:30 доплеровские спектры стали диффузными, доплеровское смещение частоты основной моды, флуктуируя с периодом около 3 мин, сначала уменьшалось от 0 до – 0.2 Гц, а затем увеличивалось от – 0.2 до 0 Гц. Это продолжалось около 60 мин. С 19:30 до 20:00 для основной моды  $f_D(t) \approx 0$  Гц. После 20:00 имели место значительные (до 0.3 Гц) вариации  $f_D(t)$ .

Добавим, что в интервале времени с 17:50 до 19:25 наблюдались сильные (до 30 дБ) вариации уровня амплитуды сигнала.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Радиотрасса Hwaseong – Harbin.** Поведение доплеровских спектров в день землетрясения и в контрольные дни заметно отличается. При  $f_D(t) \approx 0$  Гц радиоволны отражались от стабильного слоя  $E$  или  $E_s$ . После 17:50 отражение имело место от  $F$ -области ионосферы. Этим объясняются значительные вариации  $f_D(t)$ . Если изменения характера вариаций в 18:20 и 18:56 связаны с землетрясением, то наблюдаемым возмущениям соответствуют времена запаздывания  $\Delta t_1 = 12$  мин и  $\Delta t_2 = 48$  мин. Кажущуюся скорость распространения возмущений можно оценить из следующего соотношения:

$$v = \frac{D}{\Delta t_1 - \Delta t_0},$$

где  $\Delta t_0$  – время распространения возмущения по вертикали от поверхности Земли до ионосферы (до  $E$ -области ионосферы  $\Delta t_0 \approx 5.5$  мин). Тогда  $v_1 \approx 3.3$  км/с, а  $v_2 \approx 540$  м/с. Значения  $v_1$  близки к скорости сейсмических волн, а значения  $v_2$  – к скорости акустических (инфразвуковых) и атмосферных гравитационных волн. На данной радиотрассе наблюдались оба типа волн. Для инфразвуковых волн  $T \approx 3$  мин, для вторых  $T \approx 20$  мин. Зная  $f_{Da1} \approx 0.05 - 0.10$  Гц и  $f_{Da2} \approx 0.20 - 0.25$  Гц, можно оценить амплитуду относительных возмущений концентрации электронов  $N$  [39]

$$\delta_{Na} = \frac{\Delta N_a}{N_0} = \frac{K(\theta) c T f_{Da}}{4\pi L f},$$

где  $K(\theta)$  – коэффициент, зависящий от угла падения  $\theta$  радиоволны на ионосферу и высоты отражения радиоволны  $z_r$ , а также  $R$  и радиуса Земли,  $L \approx 2H$ ,  $H$  – высота однородной атмосферы. При  $z_r \approx 200 - 250$  км,  $2H \approx 80$  км имеем  $K \approx 3.6 - 3.1$ . Тогда для инфразвука  $\delta_{Na} \approx 0.15 - 0.31\%$ , а для атмосферной гравитационной волны (АГВ) –  $\delta_{Na} = 7 - 8\%$  при  $f_{Da} \approx 0.25$  Гц.

Отметим, что в интервале времени 18:30 – 19:30 имеет место антикорреляция  $f_D(t)$  и  $A(t)$ . Увеличению  $f_D$  на 0.5 Гц соответствует уменьшение  $A$  на 30 дБ. Такое поведение связано с увеличением концентрации электронов в поле волны с  $T \approx 30$  мин на 7 – 8%. К уменьшению  $A$  приводит дефокусировка радиоволны линзой, образованной в ионосфере при увеличении  $N$  в поле волны. Горизонтальный размер линзы около 270 – 450 км при скорости АГВ 0.3 – 0.5 км/с. Такой же размер и фокусирующей линзы, приводящей к увеличению  $A$ .

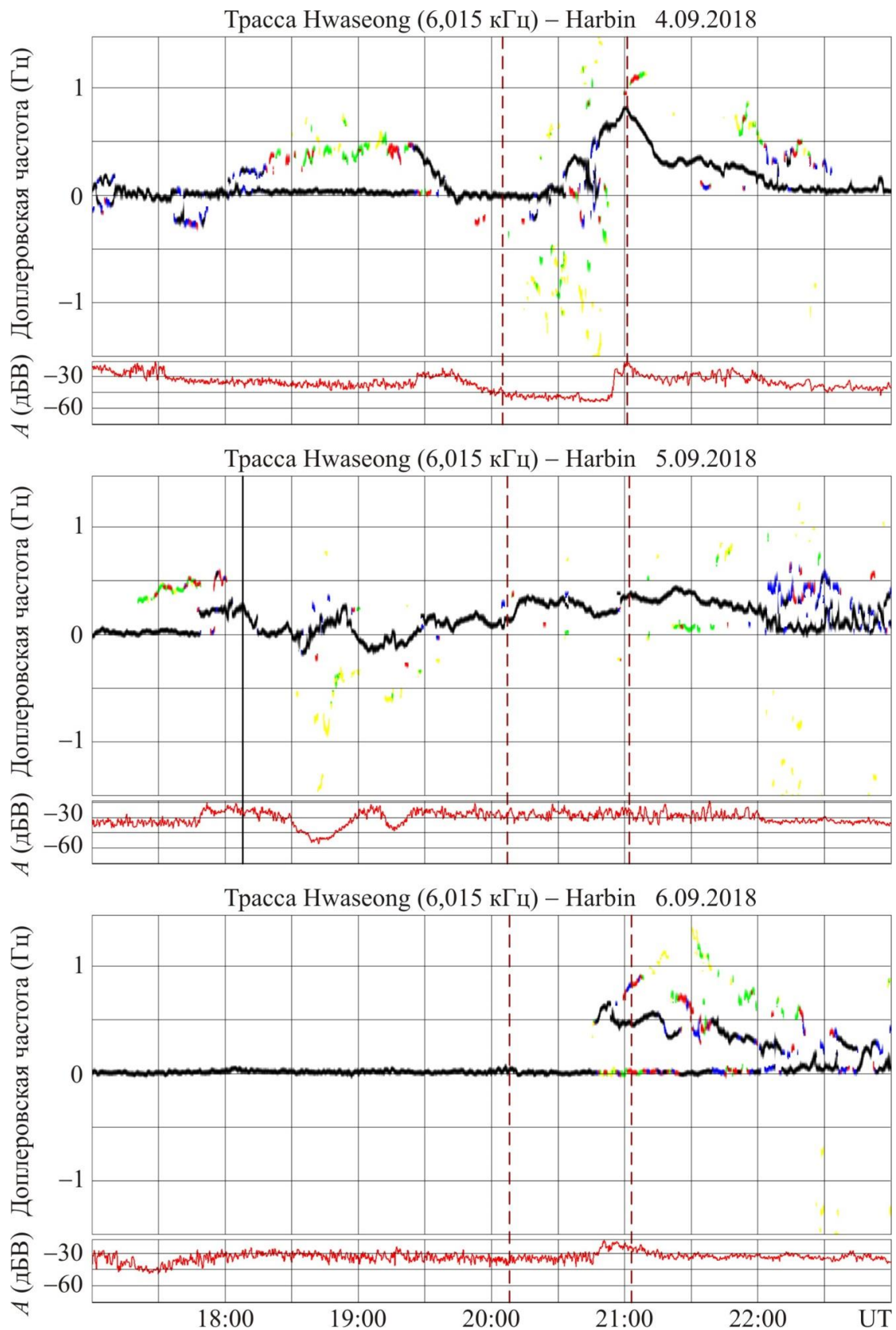


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала на радиотрассе Hwaseong – Harbin 4, 5 и 6 сентября 2019 г. Здесь и далее непрерывная вертикальная линия на панели 5.09.2018 соответствует моменту землетрясения, вертикальные пунктирные линии на панелях – моментам восхода Солнца на высотах 100 км и 0 км.

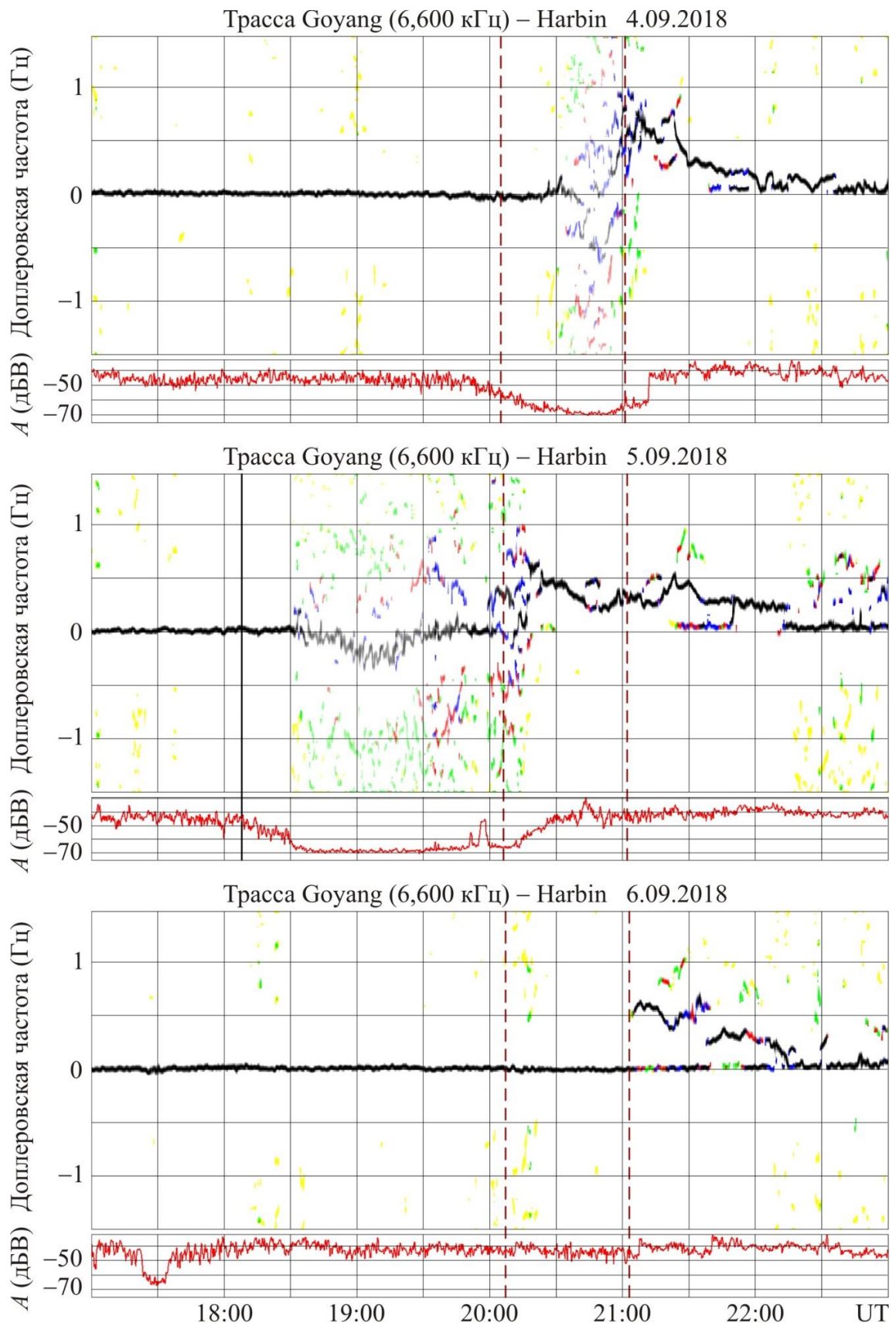


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала на радиотрассе Goyang – Harbin 4, 5 и 6 сентября 2019 г.

**Радиотрасса Goyang – Harbin.** В день землетрясения до 18:30  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Волна отражалась от Е-области ионосферы, точнее от слоя  $E_s$ . После 18:30 амплитуда сигнала уменьшилась на 25 дБ, доплеровское смещение частоты основной моды сначала уменьшилось от 0 до  $-(0.15 - 0.25)$  Гц, а затем увеличилось от этих значений до 0 Гц. Такое поведение  $A(t)$  и  $f_D(t)$  свидетельствует о том, что отражение радиоволны практически прекратилось из-за того, что значение  $f$  приблизилось в ночное время к частоте проникновения радиоволны через ионосферу. Для данной радиотрассы плазменная частота, начиная с которой волна проходит сквозь ионосферу, не более 3.6 – 4.0 МГц.

Во флуктуациях  $f_D(t)$  проявлялись квазипериодические процессы с  $T \approx 3$  мин и  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. При этом  $\delta_{Na} \approx 2 - 4\%$ .

После 19:30 на возможные эффекты землетрясения наложился эффект утреннего солнечного терминатора.

В целом изложенные в статье результаты соответствуют результатам исследования эффектов в ионосфере другого землетрясения [40, 41].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен ретроспективный анализ результатов многочастотного многотрассового наклонного зондирования ионосферы в день умеренного ( $M \approx 6.6$ ) землетрясения в Японии 5 сентября 2018 г. и в контрольные дни.

2. Обнаружено, что характер вариаций доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты основной моды и амплитуды сигнала в день землетрясения и в контрольные дни заметно отличался.

3. Выявлено две характерные кажущиеся скорости распространения возмущений: 3.3 км/с и около 500 м/с. Первая скорость близка к скорости сейсмических волн, а вторая – к скорости акустико-гравитационных волн в ионосфере Земли.

4. По оценкам амплитуда относительных возмущений концентрации электронов в поле инфразвуковой и атмосферной гравитационной волн была  $\sim 0.15 - 0.31\%$  и 7 – 8% соответственно.

Работа выполнена в рамках Договора о сотрудничестве между Харьковским национальным университетом имени В. Н. Каразина и Харбинским инженерным университетом. Работа К. П. Гармаша, Л. Ф. Черногора и С. Н. Шульги частично поддерживалась в рамках госбюджетных НИР, заданных МОН Украины (соответственно государственные номера 0118U002039, 0119U002538 и 0118U002033). Работа Yiyang Luo, Qiang Guo, Yu Zheng, частично поддержана грантами КНР (номера грантов HEUCFG201832, HEUCFP201840, GX16A007, 702SKL2017200).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ


Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.


## Authors' ORCID ID

Y. Luo  <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

Q. Guo  <https://orcid.org/0000-0002-8366-7163>

Yu Zheng  <https://orcid.org/0000-0001-6166-5733>

K. P. Garmash  <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

S. M. Shulga  <https://orcid.org/0000-0003-0626-4405>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bolt B. A. Seismic Air Waves from the Great Alaskan Earthquake // *Nature*. – 1964. – V. 202, N. 4937. – P. 1095–1096.
2. Donn W. L., Posmentier E. S. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake // *J. Geophys. Res.* – 1964. – V. 69, N. 24. – P. 5357–5361.
3. Davies K., Baker D. M. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28 // *J. Geophys. Res.* – 1965. – V. 70, N. 9. – P. 2251–2253.
4. 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. – V. 71, N. 1. – Pp. 343–345.
5. Павлов В. А. Воздействие землетрясений и извержений вулканов на ионосферную плазму // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1979. – Т. 22, № 4. – С. 19–37.
6. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Сорокин В. М., Федорович Г. В. О генерации геомагнитных генераций акустическими колебаниями во время землетрясений // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. – 1979. – № 3. – С. 58–68.



7. Доильнищина Э. Г., Дробязко И. Н., Павлов В. А. О влиянии землетрясений на концентрацию электронов в слое F ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. – 1981. – Т. 24, № 7. – С. 783 – 793.
8. Павлов В. А. Акустический импульс над эпицентром землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. – 1986. – Т. 26, №.5. – С. 807–815.
9. 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.
10. Baba K., Hayakawa M. The Effect of Localized Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation on the Basis of the Finite Element Method // In book: Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction / Edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa. – Tokyo: TERRAPUB, 1994. – P. 399–407.
11. 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, 6–10 июня 1993 года, Киев, Украина. – Киев: Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет им. Тараса Шевченка, 1994. – С. 151–160.
12. Calais E., Minster J. B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake // Geophys. Res. Lett. – 1995. – V. 22. – P. 1045–1048.
13. Calais E., Minster J. B., Bernard J. GPS, Earthquake, the ionosphere and Space Shuttle // Physics of Earth and Planet. – 1998. – V. 105. – P. 167–181.
14. Calais E., Minster J. B., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. Ionosphere signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements // Geophys. J. Int. – 1998. – V. 132. – P. 191–202.
15. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. – 1998. – № 405. – С. 157–177.
16. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника, 1999. – № 427. – С. 3–22.
17. 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 // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53, N. 4–5. – P. 6–20.
18. 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 // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53, N. 6. – P. 1–22.
19. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники, 1999. – № 7. – С. 3–15.
20. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники, 1999. – № 8. – С. 3–19.
21. Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М.: МИФИ, 2000. – 448 с.
22. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., Plotnikov A. V., Uralov A. M. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // Annales Geophysicae. – 2001. – V. 19, N. 4. – P. 395–409.
23. Сорокин В. М., Чмырев В. М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 6. – С. 821–830.
24. Афраймович Э. Л., Кирюшкин В. В., Перевалова Н. П. Определение характеристик ионосферного возмущения в ближней зоне эпицентра землетрясения // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47, № 7. – С. 822–830.

25. Ducic V., Artru J., Lognonne P. Ionospheric remote sensing of the Denali earthquake Rayleigh surface waves // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30, № 18. – P. 1951. doi:10.1029/2003GL017812.
26. Pulnits S., Boyarchuk K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes.* – Berlin: Springer-Verlag, 2004. – XIII, 315 p.
27. Garcia R., Crespon F., Ducic V., Lognonné P. Three-dimensional ionospheric tomography of post-seismic perturbations produced by the Denali earthquake from GPS data // *Geophys. J. Int.* – 2005. – V. 163. – P. 1049–1064.
28. Heki K., Ping J. Directivity and apparent velocity of the coseismic traveling ionospheric disturbances observed with a dense GPS array // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2005. – V. 236. – P. 845–855.
29. Федоренко А. К., Лизунов Г. В., Роткель Х. Спутниковые наблюдения квазиволновых возмущений атмосферы на высотах области F, вызванных мощными землетрясениями // *Геомагнетизм и аэронавтика.* – 2005. – Т. 45, № 3. – С. 403–410.
30. Afraimovich E. L., Astafieva E. I., Kirushkin V. V. Localization of the source of ionospheric disturbance generated during an earthquake // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy.* – 2006. – V. 6. – GI2002, doi:10.1029/2004GI000092.
31. Heki K., Otsuka Y., Choosakul N., Hemmakorn N., Komolmis T., Maruyama T. Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* – 2006. – V. 111. 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., Liu C. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004 // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – V. 33, L0213, doi:10.1029/2005GL023963.
33. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L. Long-distance propagation of traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // *Earth Planets Space.* – 2006. – V. 58. – P. 1025–1031.
34. Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., Maruyama T. A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // *Earth, Planets and Space* – 2007. – V. 59. – P. 1015–1026.
35. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Мейстер К. В., Липеровская Е. В. Физические модели связей в системе литосфера – атмосфера – ионосфера перед землетрясениями // *Геомагнетизм и аэронавтика.* – 2008. – Т. 48, № 6. – С. 831–843.
36. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – М.: Наука. 2008. – 295 с.
37. Afraimovich E. L., Feng Ding, Kiryushkin V. V., Astafyeva E. I., Shuanggen Jin, Sankov V. A. TEC Response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes // *International Journal of Remote Sensing.* – 2010. – V. 31, Issue 13. – P. 3601 – 3613.
38. Кирюшкин В. В., Афраймович Э. Л., Астафьева Э. И. Эволюция сейсмо-ионосферных возмущений по данным плотной сети станции GPS // *Космические исследования.* – 2011. – Т. 49, № 3. – С. 236–248.
39. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Qiang, Zheng Yu, Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цимбал А. М. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Радіофізика та електроніка".* – 2018. – Вип. 28. – С. 88 – 93.
40. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2019. – Vol. 186. – P. 88 – 103.
41. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018 // *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 – May 31, 2019.* – P. 87 – 88.
42. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 // *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 – May 31, 2019.* – P. 88 – 90.
43. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding // *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2-6, 2019.* – P. 88 – 93.
44. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 // *Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science. Programme, Abstracts, information.* – 2019. – P. 33.

45. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere over China during the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018 // Radio Sci. – 2020. – In Press.
46. Marple S. L. (1987). Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs, NJ: 707 Prentice-Hall, 1987. – 708 p.