

ISSN 2311-0872 (Print)



**KARAZIN UNIVERSITY**  
**CLASSICS AHEAD OF TIME**



Visnyk of V.N. Karazin  
Kharkiv National University

**Series Radio Physics and Electronics**



Вісник Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна  
серія

**РАДІОФІЗИКА  
ТА ЕЛЕКТРОНІКА**

**30'2019**

**ISSN 2311-0872**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ВІСНИК**  
**ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ**  
**імені В.Н. КАРАЗІНА**

**Серія “ РАДІОФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА ”**

**Випуск 30**

Започаткована 1971 р.

Харків 2019

У збірнику представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень, що спрямовані на розв'язання актуальних задач сучасної радіофізики. До них відносяться: розповсюдження радіохвиль в навколосемному просторі, його діагностика з використанням радіофізичних методів, розповсюдження і дифракція електромагнітних хвиль у електродинамічних структурах, взаємодія лазерного випромінювання з речовиною та біологічними об'єктами, фізичні принципи у напівпровідникових приладах та ін.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів старших курсів радіофізичних спеціальностей.

Видання є фаховим у галузі фіз.-мат. наук (Наказ МОН України №1328 від 21.12.2015 р.).

В сборнике представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение актуальных задач современной радиофизики. К ним относятся: распространение радиоволн в околоземной среде, ее диагностика с использованием радиофизических методов, распространение и дифракция электромагнитных волн в сложных электродинамических структурах, взаимодействие лазерного излучения с веществом и биологическими объектами, физические принципы в полупроводниковых приборах и др.

Для научных работников, аспирантов, студентов старших курсов радиофизических специальностей.

Издание является специализированным в области физ.-мат. наук (Приказ МОН Украины №1328 от 21.12.2015 г.).

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна ( протокол №7 від 24.06.2019 р.).

### **Редакційна колегія**

*Відповідальний редактор* – д.ф.-м.н., проф. **Шульга С.М.**

д.ф.-м.н., проф. **Аркуша Ю.В.**, Україна  
д.ф.-м.н., проф. **Горобець М.М.**, Україна  
д.ф.-м.н., проф. **Катрич В.О.**, Україна  
акад. НАНУ **Литвиненко Л.М.**, Україна  
проф. **Фролов В.Л.**, Росія  
акад. НАНУ **Шульга В.М.**, Україна

проф. **Блаунштейн Н.**, Ізраїль  
д.ф.-м.н., проф. **Дюбко С.П.**, Україна  
д.ф.-м.н., проф. **Колчигін М.М.**, Україна  
д.ф.-м.н., проф. **Потапов О.О.**, Росія  
д.ф.-м.н., проф. **Шматько О.О.**, Україна  
д.ф.-м.н., проф. **Чорногор Л.Ф.**, Україна

акад. НАНУ **Яковенко В.М.**, Україна

*Заступник відповідального редактора* – к.ф.-м.н., доц. **Цимбал А.М.**

Адреса редакційної колегії: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, факультет радіофізики,  
біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

тел. (057) – 707-51-23, e-mail: [radiovisnik@karazin.ua](mailto:radiovisnik@karazin.ua)

[www-radiovestnik.univer.kharkov.ua](http://www-radiovestnik.univer.kharkov.ua)

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №11825-696 ПР від 04.10.2006

© Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2019

Original article

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-01>

УДК 550.388

## IONOSPHERIC PROCESSES OBSERVED WITH THE PASSIVE OBLIQUE- INCIDENCE HF DOPPLER RADAR

Qiang Guo<sup>1</sup>, Yu Zheng<sup>2</sup>, L. F. Chernogor<sup>3</sup>, K. P. Garmash<sup>3</sup>, V. T. Rozumenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Harbin Engineering University, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, China

E-mail: guoqiang@hrbeu.edu.cn

<sup>2</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, China

E-mail: zhengyu@qdu.edu.cn

<sup>3</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

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

Received 10 March 2019

**Urgency.** The urgency is caused by the need to continuously monitor with radio instrumentation dynamic processes acting in the ionosphere, which arise due to variations in space weather, the impact of high-energy sources of natural and anthropogenic origin. To meet this challenge, V. N. Karazin National University and Harbin Engineering University specialists has developed a coherent multi-frequency multi-path radio system for obliquely probing the ionosphere.

**Purpose of Work.** The paper illustrates the instrument capability for the study of dynamic processes arising in the ionosphere during a solar terminator, a moderate earthquake, a strong ionospheric storm, and in the course of a partial solar eclipse.

**Techniques and Methodology.** The system design is base on the software-defined radio (SDR) technology. The system is capable of receiving radio waves in the 10 kHz – 30 MHz band. The versatile computer software permits us to adjust the system for solving various problems. The number of the radio propagation paths and their orientation depends on the problem being solved. The premise upon which this radio system operation is based is measurements of the Doppler shift of the frequency. The autoregressive algorithm provides a 0.02 Hz root-mean-square Doppler line error and 7.5-s time resolution. Having the Doppler spectrum time dependencies for various radio paths archived, time series corresponding to various radio-wave modes undergo further processing.

**Results.** As an example of successful instrument performance, dynamic processes operating in the course of a dusk terminator, the moderate (magnitude 5.9) earthquake on July 7, 2018, the strong ionospheric storm on August 26, 2018, and the partial (0.74 magnitude) solar eclipse over China on August 11, 2018 have been investigated. The ionospheric response to the impact of energy sources of various nature has been detected and investigated; it was accompanied by an increase in the number of rays, Doppler spectrum broadening, aperiodic and quasi-periodic variations in the Doppler shift of the frequency, generation of alternating sign variations in the electron density and wave disturbances having atmospheric gravity wave and infrasound parameters.

**Conclusions.** The radio system located at the Harbin Engineering University campus successfully performs continuous radio monitoring of dynamic processes caused by various energy source in the ionosphere.

**KEYWORDS:** HF Doppler radar, multipath observations, multi-frequency system, oblique-incidence ionospheric sounding, Doppler shift, Doppler spectra, solar terminator, earthquake, ionospheric storm, solar eclipse, aperiodic disturbances, wave-like disturbances, increase in a ray number

## ІОНОСФЕРНІ ПРОЦЕСИ, ЯКІ СПОСТЕРІГАЛИСЬ ПАСИВНИМ ВЧ РАДАРІМ ПРИ ПОХИЛОМУ ЗОНДУВАННІ

Qiang Guo<sup>1</sup>, Yu Zheng<sup>2</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>3</sup>, К. П. Гармаш<sup>3</sup>, В. Т. Розуменко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харбінський інженерний університет, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, Кумай

<sup>2</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, Кумай

<sup>3</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

**Актуальність.** Актуальність обумовлена необхідністю безперервного радіофізичного моніторингу динамічних процесів в іоносфері, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом високоенергійних джерел природного й антропогенного походження. Для цього фахівцями з Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та Харбінського інженерного університету розроблено когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери.

**Метою** роботи є ілюстрація працездатності комплексу на прикладі вивчення динамічних процесів в іоносфері при русі сонячного термінатора, протягом помірного землетрусу, сильної іоносферної бурі та в період часткового сонячного затемнення.

**Методи і методологія.** При розробці комплексу використовувалася технологія програмного радіо (SDR). Комплекс здатний приймати радіосигнали в діапазоні частот 10 кГц – 30 МГц. Розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке залежить від кола розв'язуваних задач. Кількість радіотрас та їх орієнтація залежать від специфіки розв'язуваних задач. У основі функціонування комплексу лежать вимірювання доплерівського зсуву частоти. За допомогою авторегресійного алгоритму забезпечується роздільна здатність за частотою 0.02 Гц та за часом 7.5 с. Після отримання часових залежностей доплерівських спектрів для різних трас виконується подальша обробка часових рядів, що відповідають різним модам радіохвилі.

**Результати:** Успішне функціонування комплексу продемонстровано на прикладі дослідження динамічних процесів в іоносфері при русі сонячного термінатора, протягом помірного ( $M \approx 5.9$ ) землетрусу 7 липня 2018 р., сильної іоносферної бурі 26 серпня 2018 р. та в період часткового (фаза близько 0.74) сонячного затемнення над Китаєм 11 серпня 2018 р. Виявлено та досліджено реакцію іоносфери на вплив джерел енерговиділення різної природи, яка супроводжувалася посиленням багатопроменевості, уширенням доплерівських спектрів, аперіодичними та квазіперіодичними варіаціями доплерівського зсуву частоти, генерацією знакозмінних варіацій концентрації електронів і хвилевих збурень з параметрами атмосферних гравітаційних хвиль та інфразвуку.

**Висновок:** Розміщений на території Харбінського інженерного університету комплекс успішно здійснює безперервний радіофізичний моніторинг динамічних процесів в іоносфері, викликаних різними джерелами енерговиділення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВЧ доплерівський радар, багатотракторні спостереження, багаточастотна система, похиле зондування іоносфери, доплерівський зсув, доплерівські спектри, сонячний термінатор, землетрус, іоносферна буря, сонячне затемнення, аперіодичні збурення, хвилеподібні збурення, багатопроменевість

## ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, КОТОРЫЕ НАБЛЮДАЛИСЬ ПАССИВНЫМ ВЧ РАДАРНОМ ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Qiang Guo<sup>1</sup>, Yu Zheng<sup>2</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>3</sup>, К. П. Гармаш<sup>3</sup>, В. Т. Розуменко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харбинский инженерный университет, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, Kumaï

<sup>2</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, Kumaï

<sup>3</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

**Актуальность.** Актуальность обусловлена необходимостью непрерывного радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере, вызванных вариациями космической погоды, воздействием высокоэнергичных источников природного и антропогенного происхождения. Для этого специалистами из Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина и Харбинского инженерного университета разработан когерентный многочастотный многотракторный радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы.

**Целью** работы является иллюстрация работоспособности комплекса на примере изучения динамических процессов в ионосфере при движении солнечного терминатора, в течение умеренного землетрясения, сильной ионосферной бури и в период частного солнечного затмения.

**Методы и методология.** При разработке комплекса использовалась технология программного радио (SDR). Комплекс способен принимать радиосигналы в диапазоне частот 10 кГц – 30 МГц. Разработано оригинальное программное обеспечение, зависящее от круга решаемых задач. Количество радиотрас и их ориентация зависят от специфики решаемых задач. В основе функционирования комплекса лежат измерения доплеровского смещения частоты. При помощи авторегрессионного алгоритма обеспечивается разрешающая способность по частоте 0.02 Гц и по времени 7.5 с. После получения временных зависимостей доплеровских спектров для различных трас производится дальнейшая обработка временных рядов, соответствующих различным модам радиоволны.

**Результаты:** Успешное функционирование комплекса продемонстрировано на примере исследования динамических процессов в ионосфере при движении солнечного терминатора, в течение умеренного ( $M \approx 5.9$ ) землетрясения 7 июля 2018 г., сильной ионосферной бури 26 августа 2018 г. и в период частного (фаза около 0.74) солнечного затмения над Китаем 11 августа 2018 г. Обнаружена и исследована реакция ионосферы на воздействие источников энерговиделения различной природы, которая сопровождалось усилением многолучевости, уширением доплеровских спектров, аперіодическими и квазіперіодическими вариациями доплеровского смещения частоты, генерацією знакопеременных вариаций концентрации електронів и волновых возмущений с параметрами атмосферных гравитационных волн и инфразвука.

**Выводы:** Размещенный на территории Харбинского инженерного университета комплекс успешно осуществляет непрерывный радиофизический мониторинг динамических процессов в ионосфере, вызванных различными источниками энерговиделения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВЧ доплеровский радар, многотракторное зондирование, многочастотный радиотехнический комплекс, наклонное зондирование ионосферы, доплеровское смещение, доплеровские спектры, солнечный терминатор, землетрясение, ионосферная буря, солнечное затмение, аперіодические возмущения, волнообразные возмущения, многолучевость

## INTRODUCTION

The capabilities of probing the ionosphere with radio sounders at oblique incidence for solving the problems of radio wave propagation, ionospheric physics, and dynamic processes acting in the ionosphere are greater than the capabilities of digisondes operating at vertical incidence [1, 4, 7 – 22]. In the former case, intercepted signals from non-dedicated, as well as dedicated transmitters, high-frequency (HF) transmitters, e.g., the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) of HF radars (see, e.g., [23]), may be used. Observations at oblique incidence allow the radio systems to study a wide area and provide a global picture of evolving and changing dynamic structures. The receivers and transmitters operating at different frequencies and located at the same sites are used for studying the height variations in these processes. The employment of long-distance radio broadcasting in the high frequency band makes the continuous monitoring of dynamic processes operating at ionospheric heights inexpensive. The advantage of such observations is that the interference signals, which would be generated by the dedicated transmitters, are absent. Taking into account the above-mentioned reasoning, the multi-path multi-frequency radio system has been developed for probing the ionosphere at oblique incidence. Dynamic processes acting in the ionosphere have already been observed at oblique incidence by many researchers for a long time [17 – 22].

## INSTRUMENTATION AND TECHNIQUES

The researchers at the Harbin Engineering University (PRC) and V. N. Karazin Kharkiv National University have designed and produced the HF multi-path multi-frequency passive radar capable of monitoring dynamic processes operating in the ionosphere. The radar was placed in operation in May 2018. The experience of creating radio systems, which was gained in developing the radio instruments at the V. N. Karazin Kharkiv National University Radio Physics Observatory [18 – 20], was utilized to design the passive radar.

The purpose of this paper is to present a brief description of the ionospheric observations made at oblique incidence on several frequencies over multiple radio paths from the Harbin Engineering University (45.78° N, 126.68° E) where the passive Doppler radar is located [24 – 32]. The parameters of the midlatitude ionosphere in the ~100- to 300 – 400-km altitude are measured by using the coherent passive radar at multiple frequencies. The basic premise upon which the development of the passive radar is based is the software-defined radio (SDR) technology. The radar is capable of operating within the frequency range of 10 kHz to 30 MHz, and it includes the active antenna, the LFRX/LRTX boards, the wideband SDR receiver USRP N210, and a PC. The signal processing is performed with the computer program developed to provide very versatile system performance. The antenna intercepts signals in the 10-kHz to 30-MHz range and supplies them to the receiver, which selects the desired HF transmissions from communications and dedicated radio transmitters. The specifics of the study is the usage of a number of orientations of the propagation paths. In this study, twelve propagation paths of various orientations have been used. The basic premise upon which the system operation is based is the measurement of the Doppler shift,  $f_D$ , of the frequency, which is measurable within the ~0.01-Hz to ~1-Hz range. The passive radar makes the measurements continuously. The rate at which the radar takes 16-bit samples is equal to 12,500,000 samples/s. The radio frequency of every radio transmission is down-converted to zero, the radar sampling is decimated by a factor of 500 twice resulting in a rate of 50 samples per second and a 25-Hz band-pass filtering. The data acquired continuously are stored in the database. In every 20.5-s interval, two thousand forty eight lines in Doppler spectra are calculated in 0.0122-Hz step, which provides the 0.05-Hz Doppler resolution. The analysis of the spectra utilizes the Marple autoregressive algorithm [33] that provides a 0.02-Hz root-mean-square error in the Doppler line shift. The spectra are calculated at a rate of 0.13 s<sup>-1</sup>, ten-spectrum averaged, archived in the database, and fed on the system console at a rate of 0.13 s<sup>-1</sup>. In real time, the computer program calculates only signal parameters, that are enough to solve some problems of interest. The Doppler spectra archived in the database can be retrieved in the future and used to plot sequences of graphs for analyzing the conditions on the required radio propagation paths.

Another way of analyzing the data is to determine the Doppler shifts,  $f_{Da}$ , of the amplitude peaks in the spectra, to extract them from all Doppler spectra, and to form separate sequences for every propagation mode or polarization state. Subsequently, the time series of the Doppler shifts are subjected to various types of analysis (e.g., wavelet analysis, fractal analysis, etc.).

In the current HF Doppler investigations, the Doppler spectra are retrieved from the database and used to analyze the response of the ionosphere to the release of energy from energy sources of natural origin, e.g., the solar terminator, the partial solar eclipse over the PRC, ionospheric storms, and other causes of variability in the ionosphere. Different ionospheric disturbances are produced by different transport processes, which have their own signatures in series of the Doppler spectra. The arrival of a consecutive disturbance is manifested by change in characteristic variations in a series of the Doppler spectra. The change is identified by examination of the Doppler spectrum sequences.

## OBSERVATIONS

## 1. Solar Terminator.

Fig. 1 shows the plots of the raw Doppler spectra, with universal time along the abscissa and the Doppler shift along the ordinate. The sequence of panels is read from top to bottom and left to right for

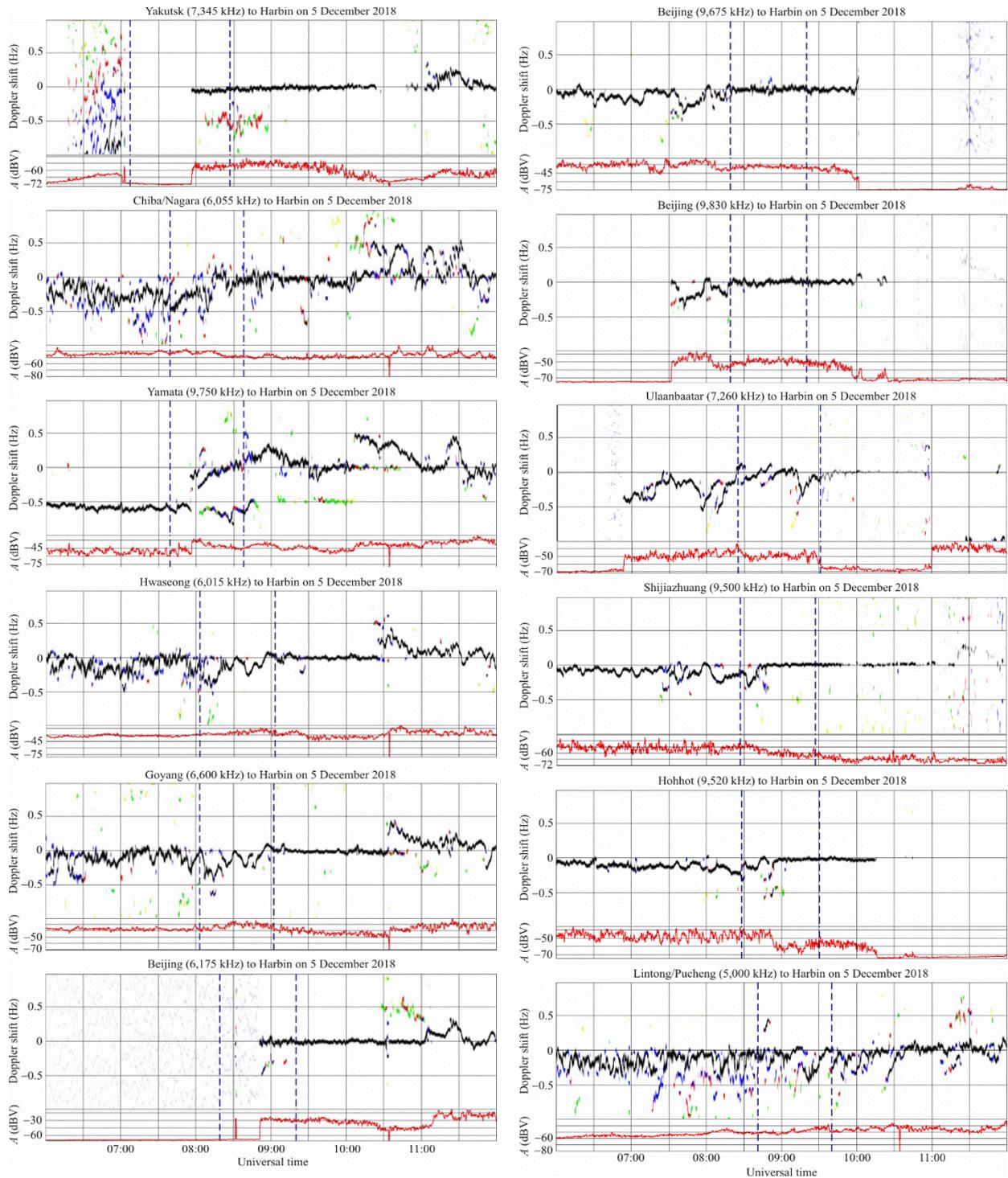


Fig. 1. Universal time variations in Doppler spectra and amplitude,  $A$ , of the signal in relative units observed on 5 December 2018. Dashed lines mark the times of sunset at the ground and at an altitude of 100 km. One-hour interval of Doppler shift graph consists of 117,600 points. Amplitude,  $A$ , of the signal in decibels, dBV, vs. 1 V at the output of the receiver is presented in each panel.

Chiba/Nagara to Harbin, Yamata to Harbin, Hwaseong to Harbin, Goyang to Harbin, Beijing to Harbin, Shijiazhuang to Harbin, Hailar/ Nanmen to Harbin, Hohhot to Harbin radio propagation paths on 5 December 2018, respectively. Under the Doppler spectrum graph in each panel, also shown is the amplitude,  $A$ , of the signal at the output of the receiver in decibels, dBV, relative to 1 V.

Fig. 1 illustrates the effect that the dusk terminator has on the time series of the Doppler spectra and the signal amplitude. The sunset at the ground and at 100-km altitude are designated by the vertical dashed lines. The important feature to note is that the effects of the dusk terminator started appearing about 1 – 1.5 h before the sunset at the ground. The dusk terminator effects are observed both during and after this process ceases. The effects of the solar terminator in the ionosphere are manifested by a variety of processes. First, in the HF Doppler shift observations, they appear as diffusive spectra. Usually, this effect is due to the scattering of the probing signals by electron-density irregularities in the ionosphere. The Doppler spectrum broadening reaches 0.5 – 1 Hz. Second, the movement of the terminator causes the generation of the atmospheric gravity waves, in the 15 – 30-min period range, which are manifested by Doppler shift variations with an about 0.05 – 0.15-Hz amplitude. Third, often, a second or even a few rays appear. A positive 0.3 – 0.5-Hz Doppler spectrum shift of the second mode can be seen over the Beijing to Harbin, Yamata to Harbin, Hwaseong to Harbin, Chiba/Nagara to Harbin, Goyang to Harbin radio propagation paths. Such magnitudes of the Doppler shift could be caused by electron density variations of the order of ~1 – 10% in the *E* and *F* regions, respectively. Over a 30-min interval (10:30 UT to 11:00 UT), the Doppler shift shows a slow decrease to zero, and the second and the main mode combine at the end of this period. Next, the Doppler shift exhibits small quasi-periodic oscillations over the same radio propagation paths.

## 2. Moderate Earthquake

The submarine earthquake occurred of the coast of Japan at 11:23:50 UT on 7 July 2018, with the epicenter coordinates 35.107°N, 140.42°E and with the hypocenter at a depth of 40 km. The earthquake magnitude on the Richter scale was 5.9. The distance between the earthquake epicenter and the City of Harbin was equal to 1,650 km.

Table 1 summarizes data on space weather state, which are needed for interpreting processes acting in the ionosphere. Presented in Table 1 are the following (from left to right): the sunspot number *W*, the 10.7-cm solar radio flux *F*<sub>10.7</sub>, the 3-hr planetary *K<sub>p</sub>* index, the equatorial hourly *Dst* index, the interplanetary magnetic field *B<sub>z</sub>* component, and the daily activity index *A<sub>p</sub>*. The space weather state on 7 July 2018 was conducive for observing the effects of the earthquake in the ionosphere. During two days before the earthquake, only two following disturbances occurred. First, a minor-to-moderate geomagnetic storming occurred on July 5 2018 when the *K<sub>p</sub>* and *Dst* indices reached maximum values. During extremely low solar activity, storms such as this could have quite significant ionospheric effects. Second, on 6 July 2018, a small burst in solar radiation occurred. The fluxes of charge particles measurements were at a level the background noise. The *K<sub>p</sub>* index did not attain 2, except for *K<sub>p</sub>* = 3 at the beginning of 6 July 2018. This section deals with the description of time variations of the Doppler shifts measured over different radio propagation paths. As a reference days, 6 July 2018 and 9 July 2018 are chosen. During all these days, multipath multiple-mode radio propagation occurs.

The seismic activity is the cause of observed aperiodic processes at ranges up to  $(1 - 2) \times 10^3$  km from the epicenter, with an increase in the number of rays, and a marked broadening of the Doppler spectra (see Fig. 2). Wave disturbances that were generated by a surface by Raleigh wave propagated from the earthquake. The 1.7 – 9% quasi-periodic variations were observed in the electron density. Oscillation train durations were found to be in the 26 – 58-min range. A speed of propagation of 3 km/s for these wave-like disturbances was equal to the speed of a Rayleigh wave. Wave-like disturbances showed 15 – 30-min periods. Such disturbances could be generated at the epicenter and propagated via atmospheric gravity waves that modify the ionospheric electron density. The 14 – 34% amplitude was observed in these electron density disturbances. Oscillation train durations were found to attain about 40–84 min, while the speed about 0.30–0.60 km/s. The most dramatic signature of the disturbances due to the earthquake is the spectrum broadening toward negative shifts with a 50–116-min delay which depends on the orientation of the radio path. Such a time delay suggests an approximately 0.3 km/s speed, and the atmospheric gravity waves generated by the earthquake as the cause of this effect.

Table 1. Space weather state

Date	<i>W</i>	<i>F</i> <sub>10.7</sub>	<i>K<sub>p</sub></i>		<i>Dst</i> (nT)		<i>B<sub>z</sub></i> (nT)		<i>A<sub>p</sub></i>
			max	min	max	min	max	min	
4 July 2018	0	68	1+	1–	14	2	5.4	–3.9	4
5 July 2018	0	68	5–	0+	15	–23	3.1	–0.9	17
6 July 2018	0	71	4–	1–	12	–12	1.0	–2.6	7
7 July 2018	0	72	2	1–	5	–10	0.7	–3.7	5
8 July 2018	0	72	1+	0+	2	–4	15.3	–3.1	4
9 July 2018	0	73	1–	0	4	–2	6.4	–8.9	2
10 July 2018	0	72	2+	0+	20	0	4.4	–4.2	6

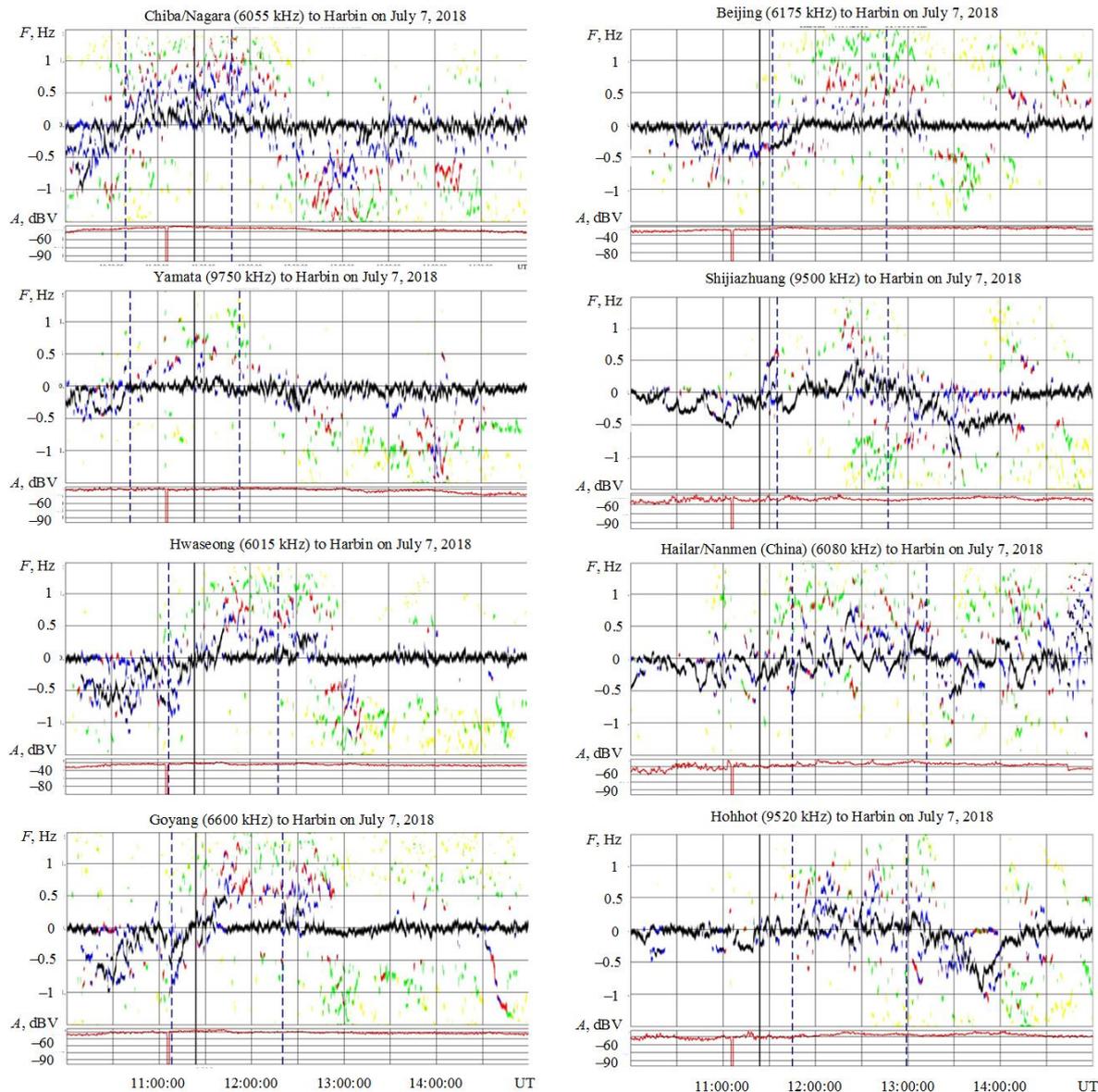


Fig. 2. Same as Fig. 1, but acquired during the submarine earthquake of Richter magnitude 5.9 that occurred of the coast of Japan at 11:23:50 UT on 7 July 2018, with the epicenter coordinates 35.107°N, 140.42°E and with the hypocenter at a depth of 40 km. The distance between the earthquake epicenter and the City of Harbin was equal to 1,650 km.

As can be seen in Fig. 2, the Doppler shift of the frequency was negative over the Hohhot to Harbin propagation path from 09:00 UT to 12:00 UT on July 7, 2018 (right-hand bottom panel), which means that the reflection level shifted upward, while the electron density in the ionosphere decreased. Over the 12:00 – 13:00 UT period, the Doppler shift of the frequency over all paths was becoming positive, and the reflection level shifted downwards. This was caused by an increase in the electron density. Quasi-periodic variations of the Doppler shift of the frequency were superimposed on its slow increases and decreases.

### 3. Ionospheric Storm

The magnetic storm of August 25–26, 2018 was the greatest in that year.

The state of the space weather over the interval August 23–29, 2018 was as follows. The peaks in the solar-wind electron density,  $N_{sw}$ , occurred on August 24, 25, and 26, 2018. The largest enhancement, from 3–4  $\text{cm}^{-3}$  to 15–20  $\text{cm}^{-3}$ , occurred during the night of August 25/26, 2018, when the solar-wind velocity varied from 300  $\text{km s}^{-1}$  to 600  $\text{km s}^{-1}$ . On August 26, 2018, the solar-wind temperature increases from  $5 \times 10^4$  K to  $3 \times 10^5$  K. During August 25–26, 2018, the solar wind dynamic pressure increases from  $\sim 0.3$  nPa to 3 nPa, while the kinetic pressure of the solar wind remains almost an order of magnitude less, down to 0.6 nPa. The  $B_z$  component of the interplanetary magnetic field attains maximum values of  $-6$  nT and  $-9$  nT on August 24 and 25, 2018, respectively. These large negative  $B_z$  values indicate the onset of the magnetic storm at Earth.

During the night of August 25/26, 2018, the parameter of Akasofu, a function showing the rate of the solar wind energy input into the Earth's magnetosphere, indicates an increase of anywhere from  $\sim 1 \text{ GJ s}^{-1}$  to  $30 \text{ GJ s}^{-1}$  and greater. The geospace storm emerges. The magnetic-activity index  $AE$  grows from  $\sim 100 \text{ nT}$  to  $1,500 \text{ nT}$ , the  $Kp$  index from  $\sim 1$  to  $7$ , but the  $Dst$  index first increases from  $0$  to  $\sim 20 \text{ nT}$  and then, after  $17:00 \text{ UT}$  on August 25, 2018, begin to decrease to approximately  $-170 \text{ nT}$ . The  $Dst$  index exhibits negative values over a few next days. The  $Kp$  index shows a new increase to a maximum of  $6$  on August 27, 2018. This means that the magnetic storm of alternating intensity extends from August 25 to August 28, 2018. The state of space weather is shown in Table 2. As can be seen from Table 2, the solar activity was enhanced, and strong magnetic storm occurred ( $K_{p\max} = 7+$ ,  $A_{p\max} = 67$ ,  $D_{s\min} = -174 \text{ nT}$ ).

Analysis of the state of the ionosphere is based on the data acquired with the DPS-4 digisonde operating in the Republic of Korea ( $37.14^\circ\text{N}$ ,  $127.54^\circ\text{E}$ ), which provided universal time dependence of the  $F_2$  layer critical frequency,  $f_oF_2$ . The  $f_oF_2$  values observed from  $22:00 \text{ UT}$  on August 25, 2018 to  $14:00 \text{ UT}$  on August 26, 2018 exceed the  $f_oF_2$  values observed over the respective time interval on the reference days of August 28/29, 2018 by a factor of  $1.3$ – $1.7$  times. This indicates that a positive ionospheric storm occurred. Moreover, the storm was accompanied by repeated decreases of  $1.5$ – $2 \text{ MHz}$  in  $f_oF_2$  values. This means that the ionospheric storm was multi-phase, positive excursions in  $f_oF_2$  alternated with negative gaps in the  $f_oF_2(t)$  dependence.

The ionospheric storm following a decrease in the  $Dst$  index at approximately  $20:00 \text{ UT}$  on August 25, 2018 was at first accompanied by an insignificant increase in the electron density,  $N$ . The next bursts in the electron density occurred at about  $00:23 \text{ UT}$ ,  $02:45 \text{ UT}$ ,  $07:45 \text{ UT}$ ,  $10:23 \text{ UT}$ , and  $12:45 \text{ UT}$  on August 26, 2018. These bursts in the electron density alternated with density decreases by a factor of  $1.8$ – $2.3$  times. Hence, this storm most distinctive feature is its multi-phase nature, two positive storms alternated with three negative storms. It should be remarked that the nature of positive and negative storms has been discussed in several papers [34–38].

The ionospheric storm led to an increase in the number of rays, Doppler spectrum broadening, and significant Doppler shifts over the ray paths. The magnitude of alternating-sign aperiodic variations in the Doppler shift of the frequency and the amplitude of their oscillations have been shown not to exceed  $0.6$ – $0.7 \text{ Hz}$  and  $0.5$ – $0.6 \text{ Hz}$ , respectively (see Fig. 3). The magnetic storm has been established to be accompanied by multi-phase ionospheric storm lasted over 16 hours, from  $22:00 \text{ UT}$  on August 25, 2018 to  $14:00 \text{ UT}$  on August 26, 2018. The distinctive feature of this ionospheric storm is that two positive storms alternated with three negative storms. Through the course of the storm, increases in the reflection level of each radio path by  $\sim 50$ – $100 \text{ km}$  and reflection height oscillations with amplitude of  $\sim 30$ – $40 \text{ km}$  were repeatedly observed. Rises in the levels of reflection were followed by lowerings of the reflection heights by many tens of kilometers. A rise and a lowering of the levels of reflection were caused by a decrease by a factor of  $1.5$ – $2$  and an increase by a few times in the electron density.

The maximum increase in the  $E$ -region electron density attained  $1.5$  times and in the  $F$  region  $3$  times. The relative amplitude of oscillations in the electron density attained many tens of percent. On the reference days, the amplitude of oscillations in the Doppler shift of the frequency was a few times less. The oscillations observed in the Doppler shift of the frequency were apparently due to the generation of the atmospheric gravity waves in high latitudes and by their subsequent propagation from high to middle latitudes where the observational facilities are located. The speed of the wave disturbances was equal to approximately  $275$ – $480 \text{ m s}^{-1}$  and the period to  $\sim 60 \text{ min}$ .

The synchronicity in the variations for all paths provide evidence for the ionospheric disturbance to be large-scale, if not a global-scale one. The scale of the disturbance was no less than  $(1-2) \times 10^3 \text{ km}$ . On the reference days, similar variations in the parameters of the Doppler spectra were absent. Hence, the variations observed in the Doppler shift of the frequency were caused by the ionospheric storm.

It should be remarked that another magnetic storm with  $K_{p\max}$  of  $\sim 5$  and  $D_{s\min}$  of  $\sim -50 \text{ nT}$  occurred on August 27, 2018, when the ionospheric disturbances were considerably smaller than on August 26, 2018.

Table 2. Space Weather State

Date	W	F 10.7	$Kp$		$Dst$ (nT)		$B_z$ (nT)		$A_p$
			max	min	max	min	max	min	
23 August 2018	15	70	2–	0+	–4	–15	1.4	–3.4	4
24 August 2018 г.	29	72	3–	0	8	–11	0.6	–1.8	4
25 August 2018 г.	31	72	4+	1–	19	–49	1.2	–3.0	12
26 August 2018 г.	26	71	7+	3	–60	–174	3.5	–4.7	67
27 August 2018 г.	12	70	6–	1+	–48	–70	4.8	–5.3	25
28 August 2018 г.	11	70	4–	0+	–27	–47	2.7	–1.5	8
29 August 2018 г.	0	71	2+	1–	–31	–40	4.2	–1.8	5

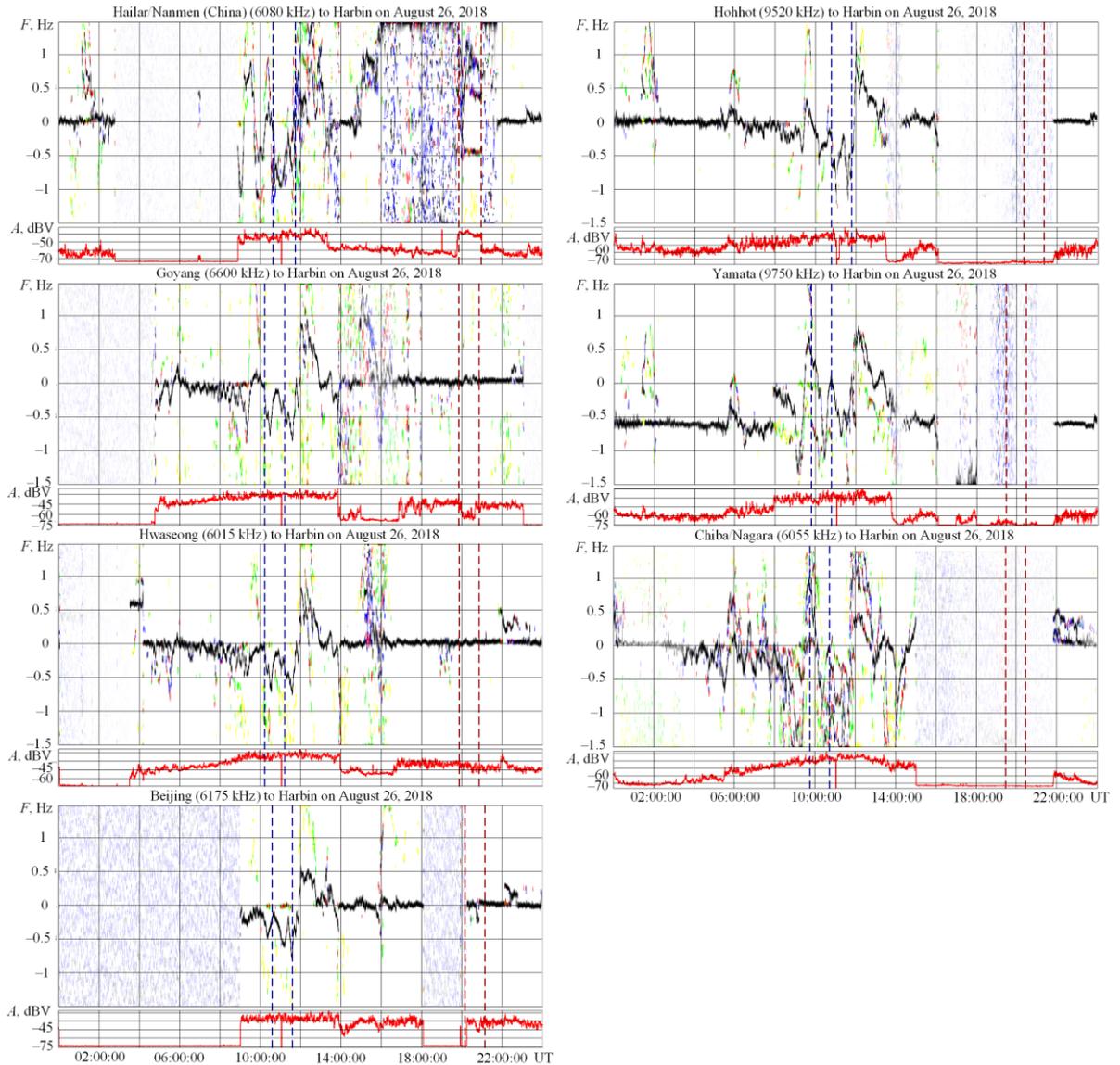


Fig. 3. Same as Fig. 1, but for the Hailar to Harbin, Goyang to Harbin, Hwaseong to Harbin, Beijing to Harbin, Hohhot to Harbin, Yamata to Harbin, Chiba to Harbin radio propagation paths (panels from top to bottom and left to right) on 26 August 2018.

#### 4. Solar Eclipse

The solar eclipse under study, Saros 155 [<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEsaros/SEsaros.html>], was observed in Asia, North Europe, Greenland, and in the North of the North America on 11 August 2018. The eclipse showed maximum magnitude,  $M$ , of 0.7368 at (70.4°N, 174.5°E) in the East Siberia Sea. Within the People's Republic of China and its vicinity, the eclipse showed lesser magnitudes, 0.073 to 0.516. The magnitudes referred to below correspond to the magnitudes at the radio propagations path midpoints. The corresponding obscurations,  $A_m$ , varied from 0.024 to 0.415. One of the event features is that the eclipse was observed before and during the sunset interval.

The analysis of the space weather state could be used to distinguish between the solar eclipse effects and the effects due to the dusk terminator. The state of space weather, prior to the solar eclipse, during, and after it, is shown in Table 3. As can be seen from Table 3, the solar activity was low, and the magnetic disturbances were insignificant. The conditions were conducive to observing effects of the solar eclipse. Consequently, they could not significantly affect the estimation of the eclipse effects. Thus, the detection of the effects caused by the solar eclipse with the effects from the dusk terminator in the background should be easier.

As can be seen in Fig. 4, the eclipse is associated at first with a negative and then with a positive Doppler shift of smaller magnitude, the generation of oscillations in the range of atmospheric gravity wave periods, and an increase in a ray number.

The results obtained in this work expand the results presented in the monograph [39].

Table 3. Space Weather State

Date	W	$F_{10.7}$	$K_p$		$Dst$ (nT)		$B_z$ (nT)		$A_p$
			max	min	max	min	max	min	
8 August 2018	0	70	2-	1-	10	-6	2.8	-2.6	4
9 August 2018	0	70	1+	0+	5	-10	3.6	-2.9	4
10 August 2018	0	70	1+	0+	9	-1	1.0	-1.8	3
11 August 2018	0	67	4-	1+	9	-16	2.9	-3.1	10
12 August 2018	0	68	2	1-	10	-9	3.6	-2.1	5
13 August 2018	0	68	1+	0+	0	-14	1.4	-3.0	4
14 August 2018	12	69	1+	0+	16	-2	1.3	-1.7	3

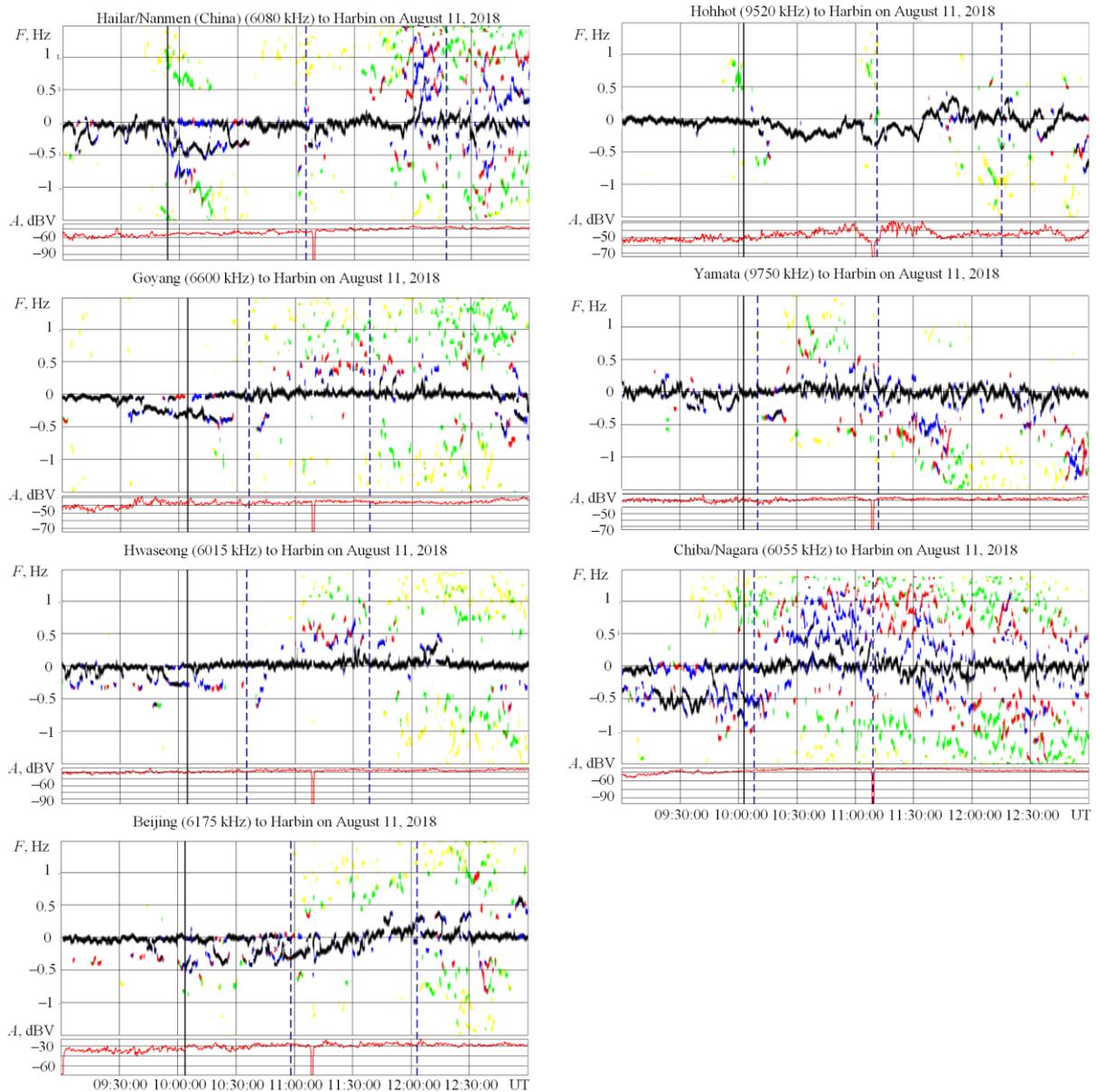


Fig. 4. Same as Fig. 1, but during the solar eclipse of August 11, 2018.

**SUMMARY AND CONCLUSIONS**

1. The multi-frequency coherent passive radar that has been developed at the Harbin Engineering University, People’s Republic of China (PRC) for sounding the ionosphere remotely over different radio paths has shown a high efficiency of observing dynamic processes occurring in the ionosphere.

The passive radar at the City of Harbin is situated near the 120°E meridian. At this meridian, the facilities included in the Meridian Space Weather Monitoring Project are situated [40]. The joint use of radio instrumentation in the Meridian Project and the passive radar at the Harbin Engineering University in collaborative studies will permit an accurate specification of the near-Earth environment under conditions of magnetospheric/ionospheric disturbance.

2. The radar proved to be capable of probing the dynamics of the ionosphere modified by the dusk terminator. The sensitivity of the Doppler variations to dynamic processes occurring in the ionosphere is greater than the sensitivity of amplitude variations. The sunset terminator has caused Doppler spectrum widening, the generation of the atmospheric gravity waves, and an increase in the number of rays reflected from the ionosphere.

3. The radar proved to be capable of probing the dynamics of the ionosphere modified by the earthquake having a moderate Richter magnitude of 5.9 in the  $\sim(1-2) \times 10^3$ -km range from the epicenter. The seismic activity is the cause of observed aperiodic processes that occurred in Japan on July 7, 2018 at ranges up to  $(1-2) \times 10^3$  km from the epicenter, with an increase in the number of rays, and a marked broadening of the Doppler spectra. Wave disturbances that were generated by a surface by Rayleigh wave propagated from the earthquake. The 1.7–9% quasi-periodic variations were observed in the electron density. Oscillation train durations were found to be in the 26–58-min range. A speed of propagation of 3 km/s for these wave-like disturbances was equal to the speed of a Rayleigh wave. Wave-like disturbances showed 15–30-min periods. Such disturbances could be generated at the epicenter and propagated via atmospheric gravity waves that modify the ionospheric electron density. The 14–34% amplitude was observed in these electron density disturbances. Oscillation train durations were found to attain about 40–84 min, while the speed about 0.30–0.60 km/s. The most dramatic signature of the disturbances due to the earthquake is the spectrum broadening toward negative shifts with a 50–116-min delay which depends on the orientation of the radio path. Such a time delay suggests an approximately 0.3 km/s speed, and the atmospheric gravity waves generated by the earthquake as the cause of this effect.

4. Using the coherent multi-path radio facility for oblique-incidence probing the ionosphere, observations have been made of radio wave characteristics in the  $\sim 6-10$  MHz band and of disturbances in the ionosphere over the People's Republic of China during the strong geomagnetic storm ( $Kp = 7+$ ) on August 25–26, 2018. Aperiodic and quasi-periodic variations in the Doppler shift of the frequency have been detected. The ionospheric storm led to an increase in the number of rays, Doppler spectrum broadening, and significant Doppler shifts over the ray paths. The magnitude of alternating-sign aperiodic variations in the Doppler shift of the frequency and the amplitude of their oscillations have been shown not to exceed 0.6–0.7 Hz and 0.5–0.6 Hz, respectively. The magnetic storm has been established to be accompanied by multi-phase ionospheric storm lasted over 16 hours, from 22:00 UT on August 25, 2018 to 14:00 UT on August 26, 2018. The distinctive feature of this ionospheric storm is that two positive storms alternated with three negative storms. Through the course of the storm, increases in the reflection level of each radio path by  $\sim 50-100$  km and reflection height oscillations with amplitude of  $\sim 30-40$  km were repeatedly observed. Rises in the levels of reflection were followed by lowerings of the reflection heights by many tens of kilometers. A rise and a lowering of the levels of reflection were caused by a decrease by a factor of 1.5–2 and an increase by a few times in the electron density.

The maximum increase in the *E*-region electron density attained 1.5 times and in the *F* region 3 times. The relative amplitude of oscillations in the electron density attained many tens of percent. On the reference days, the amplitude of oscillations in the Doppler shift of the frequency was a few times less. The oscillations observed in the Doppler shift of the frequency were apparently due to the generation of the atmospheric gravity waves in high latitudes and by their subsequent propagation from high to middle latitudes where the observational facilities are located. The speed of the wave disturbances was equal to approximately 275–480 m s<sup>-1</sup> and the period to  $\sim 60$  min.

5. The solar eclipse of August 11, 2018 is associated at first with a negative and then with a positive Doppler shift of smaller magnitude, the generation of oscillations in the range of atmospheric gravity wave periods, and an increase in a ray number.

Acknowledgements. Work by Qiang Guo and Yu Zheng was supported by Central University Basic Research Business Expenses Special Fund Project (grant numbers HEUCFG201832 and HEUCFP201840), China; Heilongjiang Province Applied Technology Research and Development Program National Project Provincial Fund (grant number GX16A007), China; and Open Fund for National Key Laboratory of Deep-Sea Manned Equipment (grant number 702SKL2017200, China). Work by L. F. Chernogor was supported by Ministry of Education and Science of Ukraine research project #0116U000822. Work by K. P. Garmash was supported by Ministry of Education and Science of Ukraine research project #0115U000463. Work by V. T. Rozumenko was supported by Ministry of Education and Science of Ukraine research project #0116U000833.

## CONFLICTS OF INTEREST

The Authors do not have conflicts of interest.

## Authors' ORCID ID

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

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

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

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

**V. T. Rozumenko**  <https://orcid.org/0000-0002-2941-8887>

## REFERENCES

- Galushko, V. G., Beley, V. S., Koloskov, A. V., Yampolski, Y. M., Paznukhov, V. V., Reinisch, B. W., Foster, J. C., Erickson, P. J., "Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs," *Radio Science*, Vol. 38, No. 6, pp. 10-1-10-9, 2003. doi: 10.1029/2002RS002861.
- Reinisch, B. W., Galkin, I. A., Khmyrov, G. M., Kozlov, A. V., Bibl, K., Lisysyan, I. A., Cheney, G. P., Huang, X., Kitrosser, D. F., Paznukhov, V. V., Luo, Y., Jones, W., Stelmash, S., Hamel, R., Grochmal, J., "New Digisonde for research and monitoring applications," *Radio Science*, Vol. 44, No. 1, pp. 1-15, 2009. doi: 10.1029/2008RS004115.
- Reinisch, B. W., Galkin, I. A., "Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO)," *Earth, Planets and Space*, Vol. 63, No. 4, pp. 377 - 381, 2011.
- Verhulst, T., Altadill, D., Mielich, J., Reinisch, B., Galkin, I., Mouzakis, A., Belehaki, A., Burešová, D., Stankov, S., Blanch, E., Kouba, D., "Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes," *Advances in Space Research*, Vol. 60, No. 8, pp. 1644 - 1656, 2017.
- Ivanov, V. A., Kurkin, V. I., Nosov, V. E., Uryadov, V. P., Shumaev, V. V., "Chirp Ionosonde and its Application in the Ionospheric Research," *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 46, No. 11, pp. 821 - 851, 2003. doi:10.1023/b:raqe.0000028576.51983.9c.
- Zalizovski, V., Kascheyev, A. S., Kascheev, S. B., Koloskov, A. V., Lisachenko, V. N., Paznukhov, V. V., Pikulik, I. I., Sopin, A. A., Yampolski, Y. M., "Prototype of a portable coherent ionosonde," *Space Science and Technology*, Vol. 24, No. 3 (112), pp. 10 - 22, 2018 (in Russian). doi: 10.15407/knit2018.03.010.
- Galushko, V. G., Kascheev, A. S., Paznukhov, V. V., Yampolski, Y. M., Reinisch, B. W., "Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves," *Radio Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 1-10, 2008. doi: 10.1029/2007RS003735.
- Pietrella, M., Perrone, L., Fontana, G., Romano, V., Malagnini, A., Tutone, G., Zolesi, B., Cander, Y. R., Belehaki, A., Tsagouri, I., Kouris, S. S., Vallianatos, F., Makris, J., Angling, M., "Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models," *Advances in Space Research*, Vol. 43, No. 11, pp. 1611 - 1620, 2009.
- Mlynarczyk, J., Koperski, P., Kulak, A., "Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting," *Advances in Space Research*, Vol. 49, No. 1, pp. 83 - 88, 2012.
- Paznukhov, V. V., Galushko, V. G., Reinisch, B. W., "Digisonde observation of TIDs with frequency and angular sounding technique," *Advances in Space Research*, Vol. 49, No. 4, pp. 700 - 710, 2012. doi:10.1016/j.asr.2011.11.012.
- Vertogradov, G. G., Uryadov, V. P., Vertogradova, E. G., Vertogradov, V. G., Kubatko, S. V., "Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation," *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 56, No. 5, pp. 259 - 275, 2013. doi: 10.1007/S11141-013-9431-3.
- Shi, S. Z., Chen, G., Yang, G. B., Li, T., Zhao, Z. Y., Liu, J. N., "Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 4, pp. 2185 - 2194, 2015.
- Shi, S. Z., Yang, G. B., Zhao, Z. Y., Liu, J. N., "A novel ionospheric oblique-incidence sounding network consisting of the ionospheric oblique backscatter sounder and parasitic oblique-incidence sounder," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 12, No. 10, pp. 2070 - 2074, 2015.
- Heitmann, J., Cervera, M. A., Gardiner-Garden, R. S., Holdsworth, D. A., MacKinnon, A. D., Reid, I. M., Ward, B. D., "Observations and modeling of ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle of arrival sounders," *32nd URSI GASS*, Montreal, 19 - 26 August 2017, pp. 1-4.
- Laštovička, J., Chum, J., "A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network," *Advances in Space Research*, Vol. 60, No. 8, pp. 1629 - 1643, 2017.

16. Garmash, K. P., Rozumenko, V. T., Tyrnov, O. F., Tsymbal, A. M., Chernogor, L. F., "Radio Studies of processes in the near-Earth plasma disturbed by high-energy sources. Part 1," *Telecommunications and Radio Engineering*, No. 7. pp. 3 – 15, 1999.
17. Blagoveshchenskaya, N. F., "Geophysical effects of active experiments in the near-Earth space," Saint-Petersberg: Gidrometeoizdat, 2001, 287 p. (in Russian).
18. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Podnos, V. A., Tyrnov, O. F., "V. N. Karazin Kharkiv National University radio physics observatory as a facility for monitoring the ionosphere during space experiments," In "Ionosat-Micro" Space Project". Kyiv: Academperiodika, 2013, pp. 160 – 182. (in Russian).
19. Garmash, K. P., Gokov, A. M., Kostrov, L. S., Rozumenko, V. T., Tyrnov, O. F., Fedorenko, Y. P., Tsymbal, A. M., 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*, Vol. 53, No. 4 – 5, pp. 6 – 20, 1999.
20. Garmash, K. P., Gokov, A. M., Kostrov, L. S., Rozumenko, V. T., Tyrnov, O. F., Fedorenko, Y. P., Tsymbal, A. M., 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*, Vol. 53, No. 6, pp. 1 – 22, 1999.
21. Blagoveshchenskaya, N. F., Andreev, A. D., Kornienko, V. A., "Ionospheric wave processes during HF heating experiments," *Advances in Space Research*, Vol. 15, No. 12, pp. 45-48, 1995.
22. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Podnos, V. A., Rozumenko, V. T., Tsymbal, A. M., Tyrnov, O. F., "The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory," *Sun and Geosphere*, Vol. 7, No. 2, pp. 133 – 139, 2012.
23. Huang, D., Liu, E., Hu, H., Liu, J., "Algorithm for the estimation of ionosphere parameters from ground scatter echoes of SuperDARN, *Sci. China Technol. Sci.* Vol. 61, No. 11, pp. 1755–1764, 2018.
24. 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*, Vol. 186, pp. 88 – 103, 2019.
25. 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, pp. 88 – 93.
26. Chernogor, L. F., Physics of geocosmic storms (in Russian) / L. F. Chernogor, I. F. Domnin // V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., Kharkiv, 2014. – 408 p.
27. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018 / Guo, Q., Chernogor, L. F., Garmash, K. P., et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 186, pp. 88 – 103, 2019.
28. Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018 / Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., et al. // *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 – 31, 2019*, pp. 87 – 88.
29. Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., et al. // *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. Kyiv, Ukraine, May 28 – 31, 2019*, pp. 88 – 90.
30. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding / Guo, Q., Zheng, Y., Chernogor, L. F., et al. // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2–6, 2019, pp. 88 – 93.
31. The Parameters of the Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk meteoroid: System Statistic Analysis Results / Guo, Q., Zheng, Y., Chernogor, L. F., et al. // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2-6, 2019, pp. 938 – 941.
32. Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., et al. // Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science. Program, Abstracts, Information. Kyiv, Ukraine, August 26 – 30, 2019, pp. 33.
33. Marple, S. L., Jr., "Digital spectral analysis: with applications," Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1987.
34. PRIME (COST 238) Studies of Ionospheric Storm Effects / Bradley, P. A., Cander, L. R., Kutiev, I., Hanbaba R. // *Adv. Space Res.*, Vol. 20, No. 9, pp. 1669–1678, 1997.
35. Danilov, A. D., Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere / Danilov, A. D., Lastovička, J. // *Inter. J. Geomagn. Aeron.*, Vol. 2, No. 3. – pp. 209–224, 2001.
36. Danilov, A. D., Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review) (in Russian) / Danilov, A. D., Morozova, L. D. // *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 25, No. 5, pp. 705 – 721, 1985.
37. Prölss, G. W., Ionospheric F-region storms / Prölss, G. W. // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*; Edited by H. Volland. CRC Press, Boca Raton, Fla., Vol. 2, pp. 195–248, 1995.

38. Buonsanto, M. J., Ionospheric Storms-a Review / Buonsanto, M. J. // Space Sci. Rev., Vol. 88, pp. 563–601, 1999.
39. Chernogor, L. F. Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: Monograph / L. F. Chernogor, Kharkiv National University, 487 p., 2013.
40. Ji, W., Chi, W., Fan, Q., “Introduction to meridian space weather monitoring project,” J. Space Sci., Vol. 26, pp. 17 – 24, 2006.

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:  $42.686^\circ\text{N}$ ,  $141.929^\circ\text{E}$ . 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 ( $43.78^\circ\text{N}$ ,  $126.68^\circ\text{E}$ ).

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	$34.95^\circ\text{N}$ , $109.56^\circ\text{E}$	Lintong/Pucheng (Китай)	1875	$40.37^\circ\text{N}$ , $118.12^\circ\text{E}$
6015	$37.21^\circ\text{N}$ , $126.78^\circ\text{E}$	Hwaseong (Корея)	950	$41.50^\circ\text{N}$ , $126.73^\circ\text{E}$
6055	$35.47^\circ\text{N}$ , $140.21^\circ\text{E}$	Chiba/Nagara (Япония)	1610	$40.63^\circ\text{N}$ , $133.45^\circ\text{E}$
6080	$49.18^\circ\text{N}$ , $119.72^\circ\text{E}$	Hailar/Nanmen (Китай)	645	$47.48^\circ\text{N}$ , $123.2^\circ\text{E}$
6175	$39.75^\circ\text{N}$ , $116.81^\circ\text{E}$	Beijing (Китай)	1050	$42.77^\circ\text{N}$ , $121.75^\circ\text{E}$
6600	$37.60^\circ\text{N}$ , $126.85^\circ\text{E}$	Goyang (Корея)	910	$41.69^\circ\text{N}$ , $126.77^\circ\text{E}$
7260	$47.80^\circ\text{N}$ , $107.17^\circ\text{E}$	Ulaanbaatar/Khonkhor (Монголия)	1496	$46.79^\circ\text{N}$ , $116.93^\circ\text{E}$
7295	$62.24^\circ\text{N}$ , $129.81^\circ\text{E}$	Yakutsk (Россия)	1845	$54.01^\circ\text{N}$ , $128.25^\circ\text{E}$
7345	$62.24^\circ\text{N}$ , $129.81^\circ\text{E}$	Yakutsk (Россия)	1845	$54.01^\circ\text{N}$ , $128.25^\circ\text{E}$
9500	$38.47^\circ\text{N}$ , $114.13^\circ\text{E}$	Shijiazhuang (Китай)	1310	$42.13^\circ\text{N}$ , $120.41^\circ\text{E}$
9520	$40.72^\circ\text{N}$ , $111.55^\circ\text{E}$	Hohhot (Китай)	1340	$43.25^\circ\text{N}$ , $119.12^\circ\text{E}$
9675	$39.75^\circ\text{N}$ , $116.81^\circ\text{E}$	Beijing (Китай)	1050	$42.77^\circ\text{N}$ , $121.75^\circ\text{E}$
9750	$36.17^\circ\text{N}$ , $139.82^\circ\text{E}$	Yamata (Япония)	1570	$40.98^\circ\text{N}$ , $133.25^\circ\text{E}$
9830	$39.75^\circ\text{N}$ , $116.81^\circ\text{E}$	Beijing (Китай)	1050	$42.77^\circ\text{N}$ , $121.75^\circ\text{E}$

### 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.

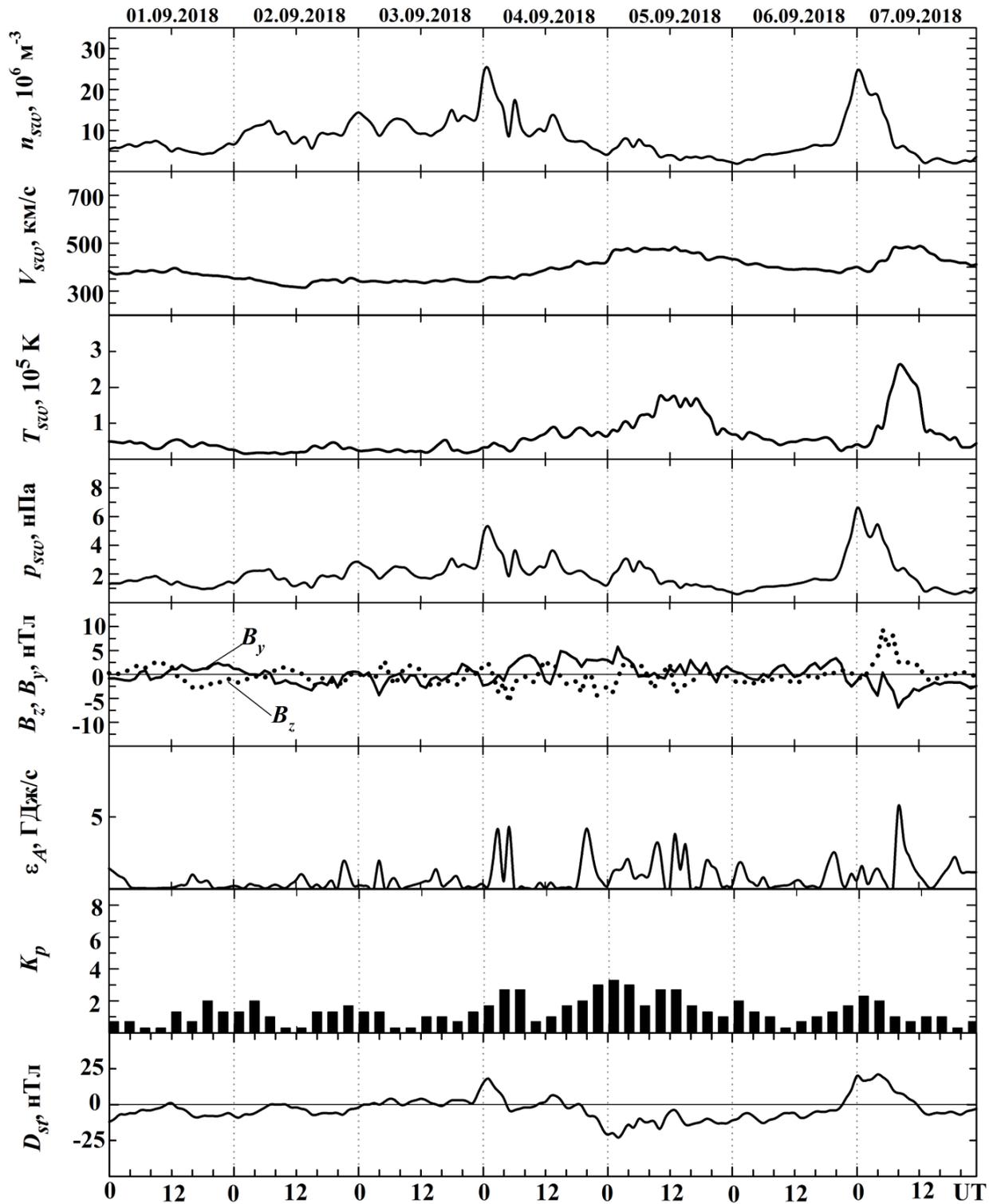


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: измеренные концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (по данным сайта [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/)) и рассчитанного динамического давления  $P_{sw}$ , 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  $A$ .

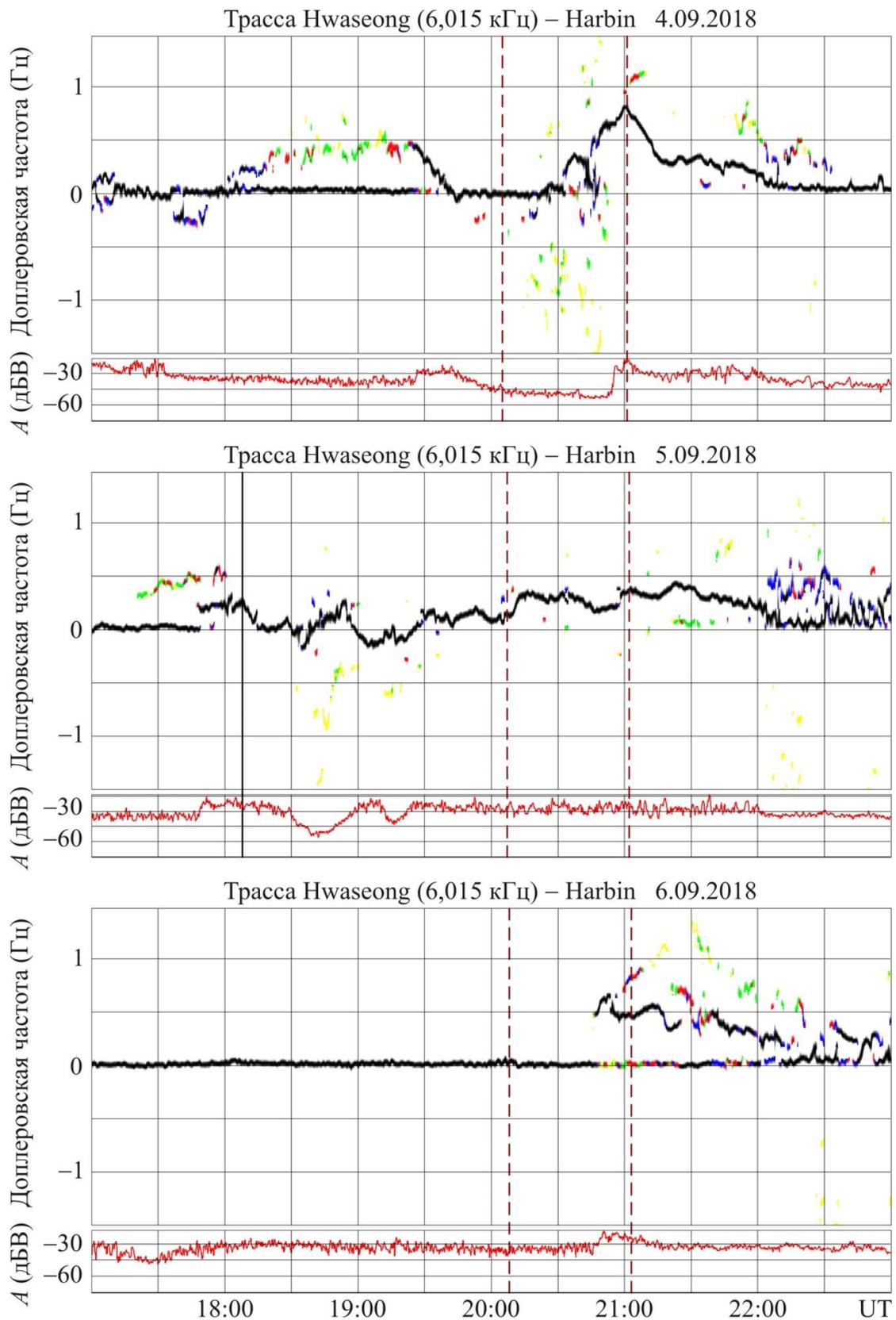


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала на радиотрассе Hwaseong – Harbin 4, 5 и 6 сентября 2019 г. Здесь и далее непрерывная вертикальная линия на панели 5.09.2018 соответствует моменту землетрясения, вертикальные пунктирные линии на панелях – моментам восхода Солнца на высотах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

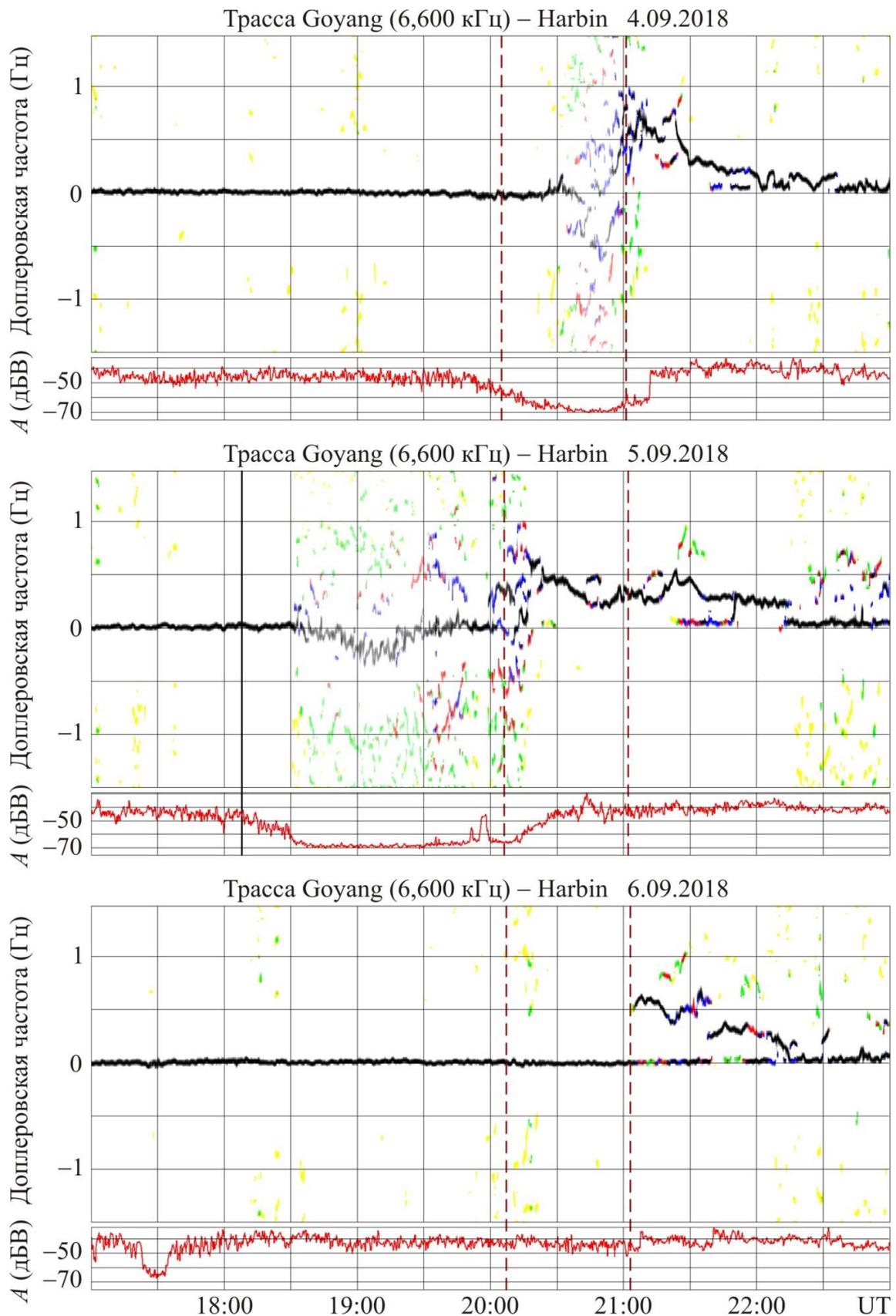


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала на радиотрассе Goyang – Harbin 4, 5 и 6 сентября 2019 г.

**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 аэронаука.* – 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 аэронаука.* – 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.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-03>

УДК 621.574.4

## ОБНАРУЖЕНИЕ НАРУШЕНИЯ КОНТАКТА МЕЖДУ ПЛОСКИМИ СЛОЯМИ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕОРАДАРОВ

Д. О. Батраков<sup>1</sup>, Иян Ло<sup>1</sup> (LUO Yiyang 骆一阳), М. С. Антюфеева<sup>1</sup>,  
С. Н. Шульга<sup>1</sup>, А.Г. Батракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: Dmitry.O.Batrakov@univer.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61000, г. Харьков, ул. Ярослава  
Мудрого, 25

Поступила в редакцию 12 февраля 2019 г.

**Актуальность** данной задачи следует из рассмотрения последствий такого дефекта дорожного покрытия как расслоение. Также актуальность обусловлена тем, что применение современных импульсных георадаров обеспечивает низкую себестоимость мониторинга автомобильных дорог. Это становится возможным при получении первичных георадарных данных в процессе движения автомобиля-лаборатории со скоростью транспортного потока, и, кроме того, благодаря исключению таких трудоёмких операций, как отбор кернов или проведение вырубки участков дорожной одежды.

**Цель работы** - проведение анализа различных методов обработки сверхширокополосных сигналов импульсных георадаров для изучения возможностей методов и алгоритмов обработки сигналов с целью повышения надёжности обнаружения расслоения.

**Материалы и методы.** В процессе обработки модельных и экспериментальных данных применялись в первую очередь современные теоретические методы обработки сигналов и компьютерного моделирования.

**Результаты.** Установлены и проанализированы факторы, определяющие отличия и характерные особенности импульсных сигналов георадаров, которые могут использоваться для обнаружения расслоения, как нарушения контакта между слоями, или обнаружения наличия тонких слоёв в составе многослойной среды.

**Выводы.** Предложенный подход к постановке задачи совместно с проделанным теоретическим анализом и результатами численного моделирования позволили в итоге обосновать возможность повышения надёжности процедуры неразрушающего контроля качества различных конструкций и эффективного выявления критических дефектов с помощью методов георадиолокации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** георадары, дистанционное зондирование, тонкие слои, плоскостойкие среды.

## ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ КОНТАКТУ МІЖ ПЛОСКИМИ ШАРАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМПУЛЬСНИХ ГЕОРАДАРИВ

Д. О. Батраков<sup>1</sup>, Иян Ло<sup>1</sup>, М. С. Антюфеева<sup>1</sup>, С. М. Шульга<sup>1</sup>, А.Г. Батракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61000, м. Харків, вул. Ярослава  
Мудрого, 25

**Актуальність** даної задачі впливає з розгляду наслідків такого дефекту дорожнього покриття як розшарування. Також актуальність обумовлена тим, що застосування сучасних імпульсних георадарів забезпечує низьку собівартість моніторингу автошляхів. Це стає можливим при отриманні первинних георадарних даних в процесі руху автомобіля-лабораторії зі швидкістю транспортного потоку, і, крім того, завдяки виключенню таких трудомістких операцій, як відбір кернів або проведення вирубки ділянок дорожнього одягу.

**Мета роботи** - проведення аналізу різних методів обробки надширококутних сигналів імпульсних георадарів для вивчення можливостей методів і алгоритмів обробки сигналів з метою підвищення надійності виявлення розшарування.

**Матеріали та методи.** В процесі обробки модельних і експериментальних даних застосовувалися в першу чергу сучасні теоретичні методи обробки сигналів і комп'ютерного моделювання.

**Результати.** Встановлено та проаналізовано чинники, що визначають відмінності і характерні особливості імпульсних сигналів георадарів, які можуть використовуватися для виявлення розшарування, як порушення контакту між шарами, або виявлення наявності тонких шарів в складі багатошарового середовища.

**Висновки.** Запропонований підхід до постановки задачі спільно з виконаним теоретичним аналізом і результатами чисельного моделювання дозволили в підсумку обґрунтувати можливість підвищення надійності процедури неруйнівного контролю якості різних конструкцій і ефективного виявлення критичних дефектів за допомогою методів георадіолокації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** георадари, дистанційне зондування, тонкі шари, плоскошаруваті середовища.

## DETECTION OF DELAMINATION BETWEEN PLANE LAYERED MEDIA USING PULSE GEODARS

D.O. Batrakov<sup>1</sup>, Luo Yiyang<sup>1</sup>, M.S. Antyufeyeva<sup>1</sup>, S.N. Shulga<sup>1</sup>, A.G. Batrakova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo st, Kharkiv, 61000, Ukraine.

**The relevance** of the problem follows from the consideration of the consequences of such serious road pavement defect as delamination. Also, the validity of the problem stems from the fact that the use of modern pulsed GPR provides low-cost monitoring of roads. This becomes possible when obtaining primary GPR data during the movement of the laboratory car with the speed of the transport stream, and, in addition, due to the exclusion of such labour-intensive operations as coring or cutting sections of pavement.

**The purpose** of the work is to analyze various processing methods for ultra-wideband signals of pulsed GPR to study the capabilities of signal processing methods and algorithms to increase the reliability of detection of delamination.

**Materials and methods.** During the investigation of the processing model and experimental data, first of all, modern theoretical methods of signal processing and computer modelling were used.

**Results.** The factors determining the differences and characteristic features of pulsed signals of GPR, which can be used to detect delamination, as a violation of contact between layers, or to detect the presence of thin layers in a multilayer medium, are established and analyzed.

**Conclusions.** The proposed approach to the formulation of the problem, together with the theoretical analysis and the results of numerical modelling, made it possible to justify the possibility of increasing the reliability of the non-destructive quality control of various structures and the effective detection of critical defects using GPR methods.

**KEY WORDS:** GPR, remote sensing, thin layers, plane-layered media.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросам неразрушающего контроля слоистонеоднородных сред с помощью импульсных георадаров посвящено множество публикаций [1-5]. Актуальность решения данной задачи применительно к дорожной отрасли обусловлена необходимостью оперативного контроля текущего состояния автомобильных дорог на участках большой протяжённости и большими затратами на ремонт и обслуживание [1,5-8]. С точки зрения используемых физико-математических приближений простейшей моделью дорожного покрытия является плоскостроистая среда, которая может содержать неоднородности (трещины, дренажные трубы и др.). В рамках такой модели не учитываются неровности (шероховатости) наружной поверхности и внутренних структурных границ раздела. Однако, как показали многочисленные экспериментальные наблюдения, неровности внешней границы практически не влияют на результат обработки данных при условии привлечения процедур предварительной калибровки сигналов с привлечением измерения отражения от листа металла [2,9]. Дело в том, что с одной стороны, реально используемый для измерения первичного импульса металла не является идеальным проводником и, как следствие, даёт меньшую амплитуду импульса, а с другой стороны – шероховатая поверхность асфальтобетона в силу рассеяния части мощности во флуктуационную компоненту, также дает в итоге меньшую амплитуду отражённого сигнала. В итоге, как показали проведённые ранее эксперименты, определить диэлектрическую проницаемость верхнего слоя асфальтобетона при тщательном соблюдении процедуры измерения удаётся с относительно высокой точностью (порядка нескольких процентов). Однако, ситуация значительно меняется с продвижением процедуры обработки данных вглубь конструкции. Уже при решении задачи определения толщины верхнего слоя могут возникнуть трудности, связанные с наличием так называемого расслоения. В мировой англоязычной литературе существуют два сходных термина – delamination и segregation (расслоение и отслоение соответственно). Первый термин обозначает нарушение контакта между слоями покрытия, которое при условии проникновения влаги, особенно в осенне-зимний период, приводит к ускоренному разрушению покрытия. Второй термин – отслоение обозначает нарушение сцепления между вяжущим (битумом) и наполнителем (щебнем). Поскольку наличие расслоения приводит к быстрому разрушению дорожной одежды, разработка методики и средств обнаружения таких дефектов является важной практической задачей. С математической точки зрения задача заключается в определении наличия тонкого слоя (толщина до 5-9 мм) между двумя верхними слоями покрытия. Отметим, что это не единственный случай подобной постановки задачи. В некоторых случаях в контролируемых технических либо строительных конструкциях могут присутствовать слои небольшой по сравнению с другими слоями толщины. Имеется в виду, что такой слой изначально предусмотрен конструкцией и требуется определить его фактическую толщину. В такой ситуации задача с точки зрения получения и обработки информации является более простой, поскольку изначально известно о требованиях к слоистой среде и задача после начальной калибровки может быть сведена к оценке невязки между эталонными измерениями и результатами, полученными на контролируемом образце. Ключевое значение имеет тот факт, что все образцы по

остальным параметрам одинаковы. В дорожной отрасли и в строительной инженерии при контроле текущего состояния транспортных сооружений и строительных конструкций часто могут существенно изменяться все другие характеристики. Поэтому, если ранее были предложены методы решения обратных задач, основанные на применении процедуры минимизации некоторого сглаживающего функционала (фактически процедуры подгонки наблюдаемых данных под некоторый эталон), то теперь необходимо решать задачу пошагового восстановления свойств всей слоистой среды (всех слоев). Понятно, что даже с точки зрения чисто вычислительной реализации это существенно более сложная задача. Исходя из общей накопленной информации, сформулируем цель данной работы следующим образом – разработка методов, позволяющих обнаружить расслоение с помощью обработки данных дистанционного зондирования георадаром при выполнении определенных условий и ограничений.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ И ВОЗМОЖНЫЕ МОДЕЛИ

Общая постановка задачи толщинометрии состоит в определении толщины слоёв и значений их диэлектрической проницаемости и, согласно [2,9], может быть представлена следующим образом:

- исследуемая среда (конструкция) облучается сверхширокополосным (СШП) импульсным зондирующим сигналом (Рис. 1);
- по результатам обработки временного профиля отражённого сигнала необходимо определить внутреннюю структуру плоскостойкой среды и значения диэлектрической проницаемости слоёв;
- полученные данные необходимо сохранить для дальнейшего анализа.

В рамках стандартной постановки задачи решение обычно разбивают на несколько этапов [10]:

- после калибровки и первичной обработки набора данных с привлечением преобразования Гильберта определяются величины временных задержек сигналов ( $\Delta t_i$ ), отражённых от структурных границ и соответствующие амплитуды сигналов;
- по формуле, следующей из формул Френеля [11], определяется  $\sqrt{\varepsilon_1}$  и далее  $\varepsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость верхнего слоя (где  $R_{j,j+1}$  - коэффициент отражения от нижней среды в верхнюю, которая в данном случае является свободным пространством):

$$\sqrt{\varepsilon_{j+1}} = \sqrt{\varepsilon_j} \frac{1 - R_{j,j+1}}{1 + R_{j,j+1}} \quad (1)$$

- далее, с помощью известных формул для коэффициентов прохождения  $T_{n\mp 1,n}$  [11]:

$$T_{n\mp 1,n} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}} \\ \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}} \end{cases} \quad (2)$$

определяются  $T_{0,1}$ ,  $T_{1,0}$  - коэффициенты прохождения через верхнюю границу в первый слой и обратно, а также  $R_{1,2}$  - коэффициент отражения от нижней поверхности первого слоя,

$$R_{n-1,n} = \frac{A_{n,n-1}}{A_{n-1,n}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} - \sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}} \quad (3)$$

и далее согласно формуле (1) вычисляется уже значение  $\varepsilon_2$  - диэлектрической проницаемости второго слоя;

- затем вышеуказанные шаги повторяются вплоть до последней границы, где определяется только диэлектрическая проницаемость полубесконечной подложки;

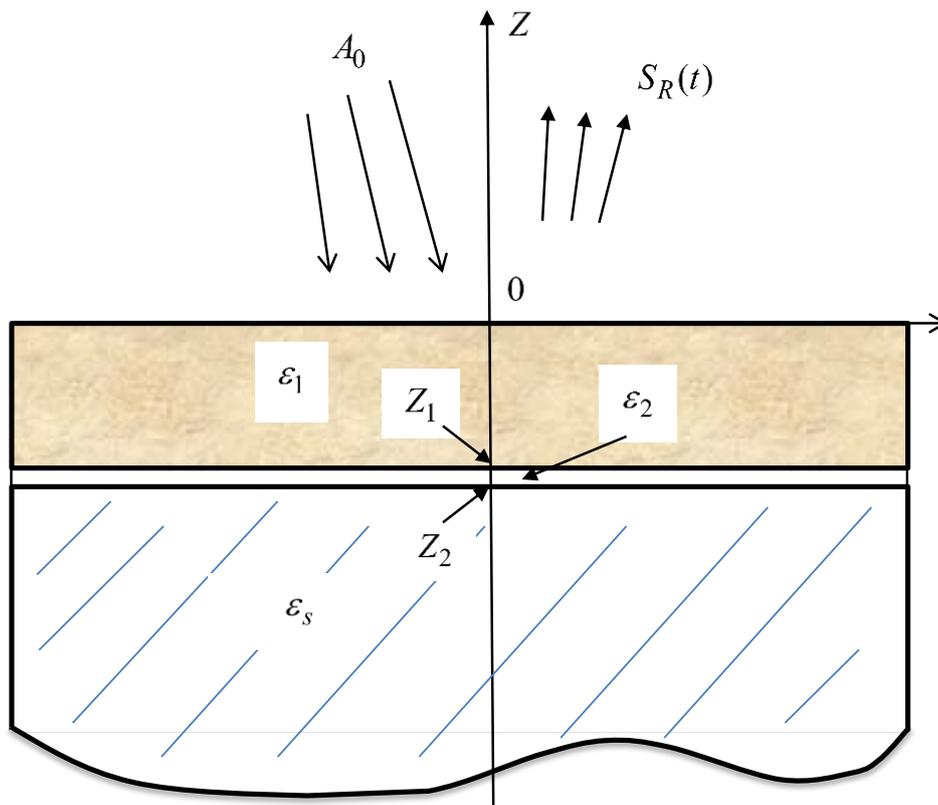


Рис. 1. Геометрия исследуемой среды.

- вычисляются координаты границ раздела между слоями как решение основного уравнения радиолокации [2, 10]:

$$D_i = \sum_{i=1}^I \frac{(\tau_i - \tau_{i-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_i}} = \sum_{i=1}^I \frac{\Delta \tau_i \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_i}}, \quad (4)$$

где:  $Z_i$  – координата  $i$ -й границы (верхняя граница имеет индекс 0),

$\tau_i, \tau_{i-1}$  – моменты прохождения сигналом  $i$  – й ( $i-1$ )– й границ соответственно, определенные на этапе 1,

$\epsilon_i$  - диэлектрическая проницаемость  $i$  – го слоя (определенная ранее),

$c$  – скорость распространения света в свободном пространстве (в воздухе);

- рассчитываются значения толщины слоев  $H_i$  по формуле:

$$H_i = Z_i - Z_{i-1}; \quad Z_0 = 0, i = 1, 2 \dots I. \quad (5)$$

В заключение добавим, что многие авторы рассматривают задачу в так называемом приближении однократного рассеяния. Иными словами, повторными отражениями сигнала от границ слоев пренебрегают. В такой постановке говорят о задаче определения формы импульсного сигнала и об алгоритме обработки такого сигнала. Для решения задач данного типа наиболее эффективным инструментом является использование так называемых сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов, иначе называемых импульсами без несущей. Большинство методов обработки таких сигналов основывается на модели возбуждения георадара с помощью сигнала, близкого к так называемой гауссоиде (иначе - импульс Гаусса) [1, 2]:

$$S(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (6)$$

Дело в том, что в процессе излучения и приема сигналов дипольными антеннами форма сигнала меняется. В итоге приемная антенна регистрирует вместо сигнала (6) сигнал близкий ко второй производной от (6) [1, 2]:

$$S''(t) = A_1 \cdot (t^2 - 1) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (7)$$

В таком случае решение задачи толщинометрии может быть алгоритмизировано путем сведения ее к поиску максимумов положительно определенной функции [2]:

$$S_G(t) = |h(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)}, \quad (8)$$

где:  $\tilde{x}(t)$ ,  $x(t)$  – результаты применения преобразования Гильберта (прямого и обратного соответственно) к принятому антенной системой георадара сигналу [2, 9].

Наконец, еще раз отметим, что в рамках задачи о тонких слоях возможны две ситуации, о которых говорилось выше. В первом случае речь следует вести о слоях со значением электрической толщины, соизмеримой с пространственным размером зондирующего импульса. Такая ситуация детально рассмотрена ранее в [12]. Второй случай – задача по обнаружению расслоения с помощью методов дистанционного зондирования. Каждая из этих задач имеет свою специфику, и поэтому в рамках данной публикации мы сосредоточим основное внимание на второй задаче – поиска расслоения, т.е. нарушения контакта между слоями конструкции.

### АНАЛИЗ ТРУДНОСТЕЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И РАНЕЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ПОДХОДОВ К ИХ ПРЕОДОЛЕНИЮ

Сначала в данном разделе подробно рассмотрим алгоритм оценки расслоения, предложенный в работе [13]. Авторы этой работы рассматривают модель расслоения в виде наличия тонкого слоя конечной толщины. Для лабораторных экспериментов они использовали акриловые панели и георадар с центральной частотой 2 ГГц. Основные трудности в рамках такой постановки задачи возникают по нескольким причинам:

- в лабораторных условиях образцы имеют конечные размеры в горизонтальных направлениях,
- при наличии нескольких слоёв могут возникать многократные отражения между их границами (далее для краткости будем называть их переотражениями),
- толщина (в данном случае также иногда говорят о расслоении как о горизонтальной трещине) трещины может быть настолько малой, что отражения от ее верхней и нижней границ могут сливаться.

Для преодоления этих трудностей возможны различные меры. Например, самым простым вариантом преодоления первой проблемы является увеличение горизонтальных размеров модели. Такой вариант предложен в [13], где размеры модели составили около 2 метров вдоль каждой из горизонтальных осей при значении центральной частоты георадара, равной 2 ГГц. Существуют и другие методы борьбы с дифракционными эффектами отражения от краёв модельного образца, состоящие в привлечении процедур калибровки – проведения специализированных измерений с последующим выделением и вычитанием дифракционных отражений [14]. Для преодоления второй трудности можно выбрать значения толщины слоёв таким образом, чтобы избежать наложения сигналов, отраженных от разных границ [13]. Также может быть использован метод вычитания парциальных сигналов [14], суть которого в последовательном расчёте значений диэлектрической проницаемости слоёв и их толщины с последующей обработкой исходного сигнала, принятого приёмной антенной. Такая обработка предполагает формирование виртуальных сигналов, соответствующих отражениям от нижних структурных границ раздела верхнего слоя и последующее формирование сигнала, который был бы принят приёмной антенной при отсутствии верхнего слоя [13, 15]. Однако, в любом случае сигнал от участка с расслоением будет представлять собой либо сумму двух (или большего числа при наличии значительных переотражений) сигналов, либо один сигнал в случае, когда между слоями нет зазора. На Рис. 2 приведены фото двух кернов с нормальным контактом между слоями (а) и с небольшим зазором между слоями (б). Самую же большую сложность представляет третья проблема (Рис. 3). Дело в том, что как показывает опыт практических обследований автомобильных дорог с жесткими покрытиями, между слоями с нарушенным контактом может вообще, не существовать никакого зазора. В таком случае в процессе эксплуатации происходит взаимная «притирка» поверхностей и контактирующие поверхности являются практически гладкими. Понятно, что обнаружить нарушение сцепления между ними чисто радиолокационными методами в такой ситуации без привлечения дополнительной информации не представляется возможным. Один из возможных путей решения этой задачи заключается в проведении дополнительных измерений, например измерения упругого прогиба под эталонной нагрузкой или использование дефлектометра падающего груза. В таком случае появляется дополнительная информация о различиях в характеристиках соседних участков дороги, которая в совокупности с данными георадарного обследования может служить основой для построения алгоритмов

обнаружения и локализации расслоения.

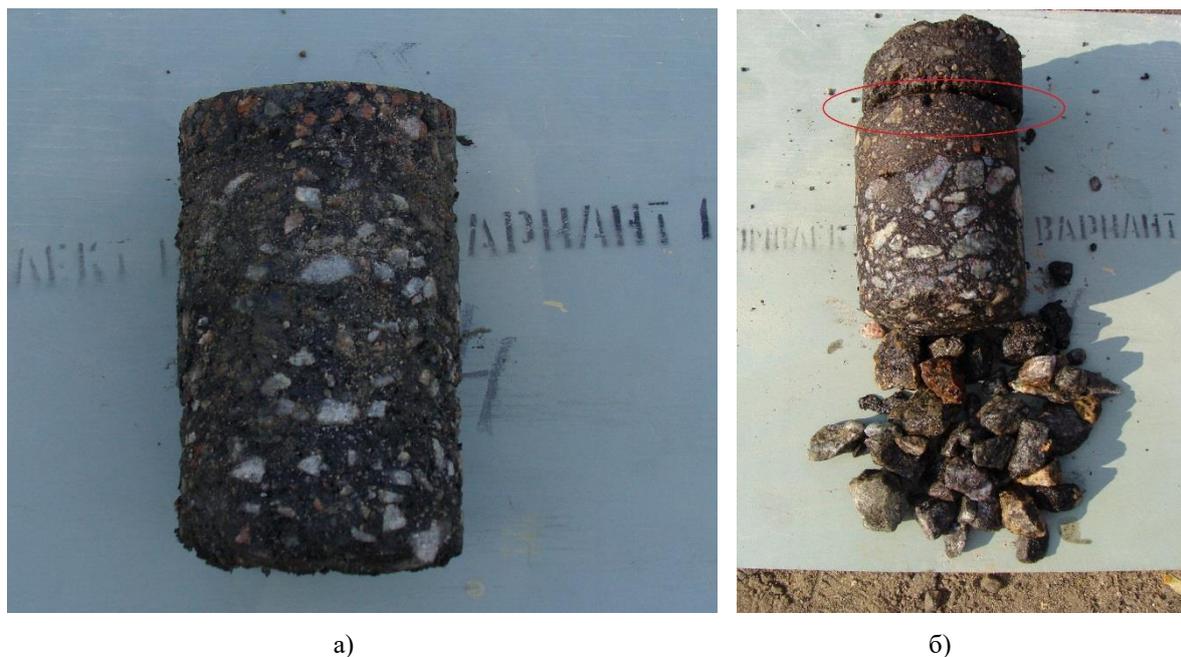


Рис.2. Керны со сцепленными слоями (а) и с расслоением (б).



Рис.3. Керны с расслоением и плотным контактом. Общий вид (а) и вид разделенных поверхностей (б).

Однако, эта методика выходит за рамки чисто радиофизических задач и требует отдельного рассмотрения с привлечением соответствующих моделей и программного обеспечения. Поэтому в данной работе прежде всего проведём анализ метода обработки сигналов, предложенного в [13]. Используя стандартные формулы (в приближении плоской волны) для расчёта коэффициентов отражения и прохождения, соответствующие формулам (1,2), авторы приводят теоретические результаты расчётов сигналов, пришедших от тонкого промежуточного слоя, находящегося в составе общей многослойной среды. С точки зрения теории сигнал, отражённый такой продольной неоднородностью, представляет собой интерференционную картину волн, которые пришли в приёмную антенну от наружной и внутренней границ трещины с учётом затухающих повторных отражений между границами этого тонкого слоя [13]. Однако, для получения корректных математических оценок этот вопрос необходимо исследовать более тщательно. Для достижения наглядности и преодоления неоправданного усложнения выкладок, введём следующую систему обозначений:

$S_0, S_0(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2), S_0(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_2)$  – временное распределение сигналов с учётом задержки,

$R_0^+$  – коэффициент отражения от наружной поверхности в сторону положительного направления оси Z,

$T_0^-, T_0^+$  – коэффициенты прохождения сигнала через внешнюю поверхность среды ( $Z=0$ ) в отрицательном и положительном направлениях оси  $Z$  соответственно,

$T_1^-, T_1^+$  – коэффициенты прохождения сигнала через вторую границу среды ( $Z_1$ ) в отрицательном и положительном направлениях оси  $Z$  соответственно,

$R_1^+, R_1^-, R_2^+$  – коэффициенты отражения от первой границы (индекс 1) и от второй границы (индекс 2) в положительном направлении оси  $Z$  (знак +) и отрицательном направлении оси  $Z$  (знак -),

$$TT_0 = T_0^- \cdot T_0^+; \quad TT_1 = T_1^- \cdot T_1^+.$$

Тогда, учитывая, что толщина первого слоя много больше толщины второго, а третий слой имеет практически бесконечную толщину, запишем выражение для результирующего сигнала с учётом лишь двукратного отражения между границами второго слоя в следующем виде:

$$S_R(t) = S_0 \cdot R_0^+ + S_0 (\Delta\tau_1) \cdot R_1^+ \cdot TT_0 + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2) \cdot TT_0 \cdot TT_1 \cdot R_2^+ + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_2) \cdot TT_0 \cdot TT_1 \cdot R_2^+ \cdot R_1^- \cdot R_2^+ + \dots \quad (9)$$

В (9) первое слагаемое соответствует отражению от наружной границы среды, второе – сигналу, отражённому от нижней границы первого слоя и затем принятому приёмной антенной, третье слагаемое – сигналу, прошедшему один раз через нижний слой и принятому приёмной антенной, и последнее слагаемое соответствует сигналу, зарегистрированному приёмной антенной после двукратного прохождения через нижний слой. Далее необходимо с помощью формул (2,3) рассчитать амплитуды этих сигналов для различных соотношений между параметрами модели. Для этих целей выберем значения параметров, характерные для нескольких распространённых ситуаций. Первый набор параметров характерен для нового слоя асфальтобетона, уложенного на уже существующее покрытие, когда в результате нарушения технологии работ возникло расслоение, но при этом вода в месте нарушения контакта между слоями отсутствует. Второй вариант соответствует наличию большого радиоконтраста между слоями, что может быть связано с наличием воды в месте нарушения контакта. Третий вариант приведён для сравнения и соответствует наличию близкого по толщине слоя, но без нарушения контакта между слоями.

Для наглядности полученные результаты расчётов сведены в таблицу, где данные представлены в виде слагаемых выражения (9), которое теперь запишем в виде:

$$S_R(t) = S_0 \cdot C_0 + S_0 (\Delta\tau_1) \cdot C_1 + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2) \cdot C_2 + S_0 (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_2) \cdot C_3 + \dots \quad (10)$$

Таблица .Результаты расчетов.

	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1 вариант	6,800	1,000	5,900	-0,446	0,357	-0,268	-0,050
2 вариант	6,800	80,000	5,900	-0,446	-0,440	-0,026	0,006
3 вариант	6,800	6,100	5,500	-0,446	0,022	-0,130	-0,001

При анализе расчётных данных, представленных в таблице, следует помнить, что все величины  $C_0, C_1, C_2, C_3$  в (10) содержат и ещё один множитель  $S_0$  с различными значениями аргументов. Вариации в значениях аргументов отражают временную задержку сигналов, пришедших от разных неоднородностей (первые три слагаемых) или претерпевших разное число переотражений (последнее слагаемое). Основу первого этапа анализа расчётных данных составляет сравнение амплитуд первых четырёх сигналов в (9). Прежде всего, отметим, что во всех рассмотренных случаях амплитуда последнего сигнала (результат повторного отражения внутри второго слоя) оказывается существенно меньше, чем для предыдущего сигнала. К тому же необходимо принимать во внимание тот факт, что при наличии зазора между слоями конструкции их поверхности не испытывают трения и могут сохранить естественную шероховатость, возникшую в процессе уплотнения при строительстве. С точки зрения дефектоскопии это приведёт к дополнительному рассеянию во флуктуационную компоненту и ещё более уменьшит амплитуду сигнала. Поэтому с учётом результатов моделирования можно сделать вывод о возможности учёта лишь первых трёх слагаемых в (10) в ситуации наличия расслоения при условии, что пространство между слоями не заполнено водой. При наличии воды между слоями асфальтобетона механизм взаимодействия приобретает иной характер ввиду величины относительной диэлектрической проницаемости воды (80). В такой ситуации второй слой является своеобразным «экраном» для дальнейшего распространения сигнала и при этом амплитуда сигнала, отражённого от внешней границы соизмерима по величине с амплитудой аналогичного сигнала в первом случае (заполнение воздухом). По понятным причинам знаки у соответствующих множителей разные. Таким образом, дальнейший анализ

необходимо проводить с учётом отмеченных результатов (Таблица) и также с учётом формы зондирующего импульса во временной области. Очевидно, что необходимо также учитывать и знаки при коэффициентах в Таблице 1. В частности, авторы работы [13] предлагают строить алгоритм распознавания наличия расслоения именно на обнаружении наличия двух сигналов разной полярности, пришедших от близко расположенных границ. Это подтверждают и данные первой строки в Таблице 1. Конкретно, коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  имеют незначительно отличающиеся амплитуды, а  $C_3$  также отрицателен, но при этом он и значительно меньше по величине, чем  $C_1$  и  $C_2$ . Следовательно, для дальнейшего продвижения необходимо более детально исследовать форму распределения такого сигнала во времени. Для этого используем программу «GeoVizu» сначала в режиме моделирования сигналов. Общая задача проведённых вычислительных экспериментов заключалась в:

- подтверждении принципиальной возможности обнаружения факта наличия расслоения в дорожной одежде нежесткого типа;
- исследовании влияния характеристик как самой дорожной одежды, так и импульсных СШП сигналов;
- оптимизации параметров зондирующего сигнала с целью повышения надёжности и достоверности обнаружения расслоения (очевидно, что речь идёт о верхних слоях конструкции);
- разработке практических рекомендаций для дорожных инженеров и операторов георадаров с целью повышения производительности их труда и обеспечения эффективных решений;
- формулировке задач последующих этапов как в чисто научном плане (с точки зрения электродинамики и теории дифракции), так и для создания более эффективных алгоритмов интерпретации наборов данных, получаемых с помощью современных СШП георадаров.

Для решения задач первых трёх пунктов были проведены серии вычислений временного распределения импульсного СШП сигнала, отражённого конструкцией дорожной одежды с расслоением в рамках простейшей модели, которая представляла собой верхний слой толщиной 6 см с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1 = 6.8$ , и следующий слой толщиной 0.7 см (модель расслоения) с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2 = 1.0$  (заполнение - воздух) и подложку, как модель старого покрытия с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_3 = 5.9$  (это типичное значение для изношенного асфальтобетона, который уже имеет много пор). Для упрощения анализа и достижения большей наглядности мы приняли толщину нижнего слоя такой (90 см), чтобы отражение от ее нижней границы не попадало в область развёртки сигнала (10 нс), разумеется, с учётом начального момента регистрации сигнала. Зондирующий импульс имеет следующие характеристики: смещение момента максимума импульса относительно начала шкалы отсчёта – 2 нс, амплитуда - 1, значение так называемого частотного множителя  $M$ , определяющего возбуждающий генератор импульс:

$$S(t) = A_1 \cdot \exp\left(-M \cdot \left(\frac{t^2}{2}\right)\right) \quad (11)$$

и, как следствие, форму зондирующего импульса (крутизну фронта импульсного сигнала), который теперь описывается соотношением:

$$S''(t) = A_1 \cdot M \cdot [M \cdot t^2 - 1] \exp\left(M \cdot \left(-\frac{t^2}{2}\right)\right). \quad (12)$$

Вид сигнала, отражённого от такой конструкции, приведён на Рис. 4. В правом верхнем углу в таблице приведены значения толщины и диэлектрической проницаемости слоёв. Амплитуда исходного сигнала равна 1, а значение множителя  $M$  в (12) принято равным 45. На рисунке хорошо виден сигнал (2), отражённый от расслоения (тонкий промежуточный слой). Он, как и говорилось ранее, имеет два практически одинаковых экстремума и внешне похож на график первой производной от гауссоиды (6).

Для наглядности на Рис.5 представлены два графика, соответствующие первой производной от гауссоиды (линия 1):

$$S'(t) = -A_1 \cdot M \cdot (t - t_s) \cdot \exp\left(-M \cdot \left(\frac{(t - t_s)^2}{2}\right)\right) \quad (13)$$

и двум графикам второй производной, но сдвинутым во времени (линия 2).

Сравнительный анализ графиков на Рис. 4, 5 свидетельствует, что сигнал 2 на Рис. 4 соответствует отражению импульса от тонкого слоя (расслоения) поскольку, как видно из Рис. 5, сигнал, соответствующий первой производной от гауссоиды, имеет два экстремума. В то же время, сигнал,

соответствующий двум графикам второй производной, но сдвинутым во времени, имеет еще небольшой третий экстремум (он обведён овалом на Рис. 5). Ещё необходимо выяснить природу сигнала на Рис. 4, который по форме похож на зондирующий импульс с относительно небольшим максимумом в точке 4.2 нс. Для выяснения природы этого сигнала было проведено моделирование с целью установить влияние повторных отражений зондирующего сигнала между границами (верхней и нижней) первого слоя. Для этого были проведены расчёты по двум моделям, соответствующим разной толщине верхнего слоя. Результаты расчётов представлены на Рис. 6.

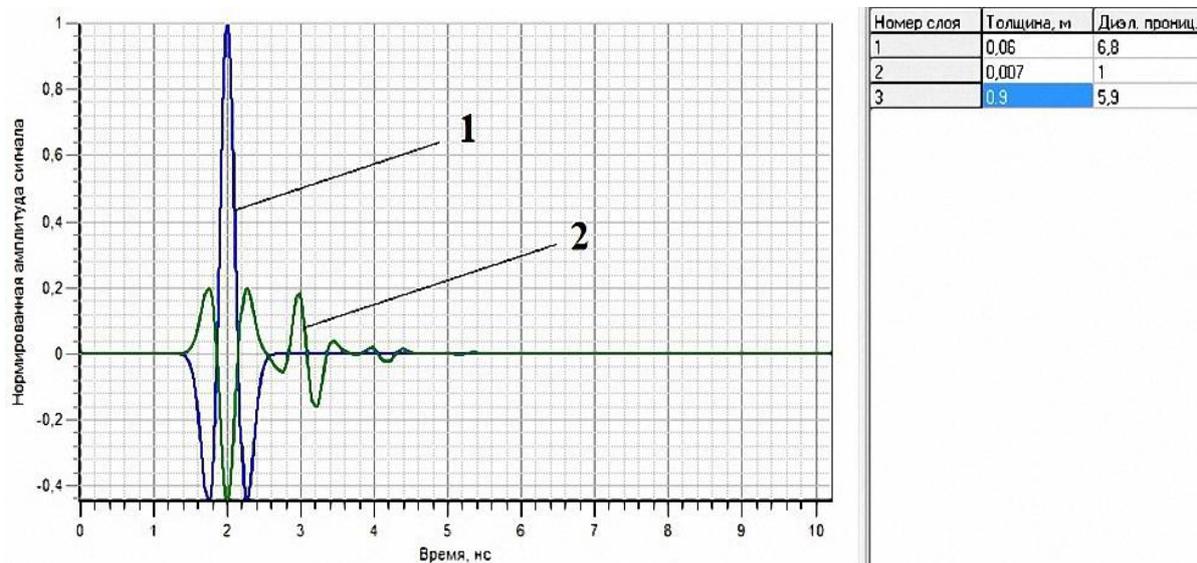


Рис. 4. Вид временного распределения зондирующего сигнала (1) и импульса, отражённого от трёхслойной конструкции (2).

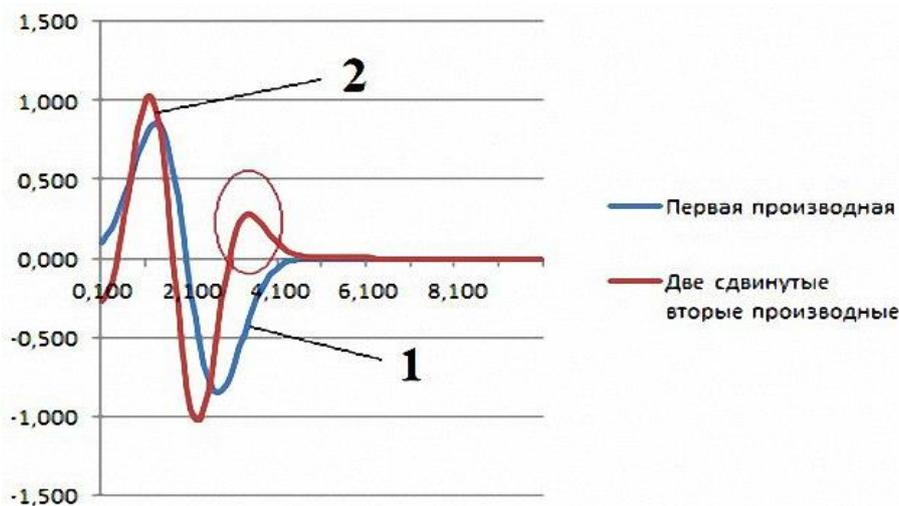


Рис. 5. Вид временного распределения сигнала, соответствующего первой производной от гауссоиды (1) и двум графикам второй производной, но сдвинутым во времени (2).

Если учесть, что временная задержка  $\Delta T$  связана со значением толщины слоя  $H$  так называемым основным уравнением радиолокации, которое в данном случае можно переписать в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{c \cdot \sqrt{\epsilon_1}}{2 \cdot H}; \quad (14)$$

то с учётом изменения толщины слоя в  $8.4/5.5=1.5$  раза получаем в точности такую же временную задержку  $D$  на Рис. 6. Максимум первого сигнала приходится на момент  $(4-2=2)$  нс, а второго сигнала – на момент  $(5-2=3)$  нс. Отсюда вычисляем  $3/2=1.5$ , что и является подтверждением высказанной выше гипотезы о том, что этот сигнал является повторным отражением зондирующего импульса между

границами верхнего слоя. К сожалению, ограниченный объем данной работы не позволяет детально рассмотреть все аспекты, связанные с процессом взаимодействия импульсных СШП сигналов с плоскостойкими средами. Авторы надеются уделить этим проблемам внимание в последующих публикациях.

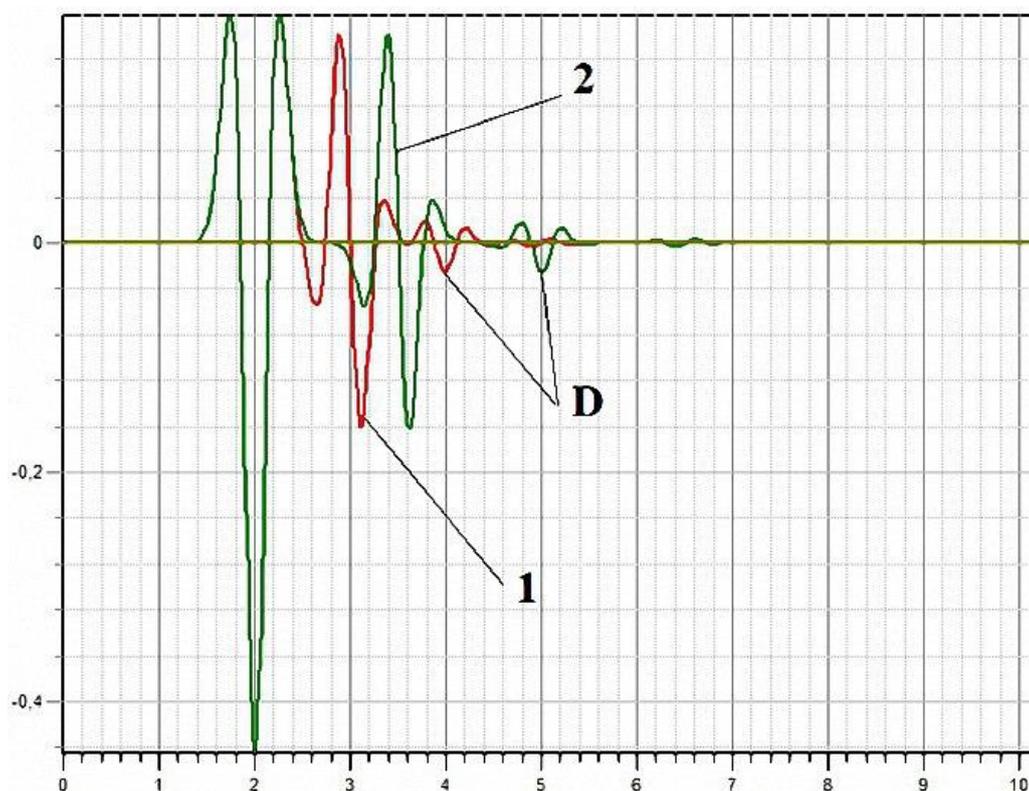


Рис. 6. Вид временного распределения сигналов, соответствующего толщине верхнего слоя 5.5 см. (1) и 8.4 см. (2).

## ВЫВОДЫ

В работе проведён анализ различных методов обработки сигналов импульсных георадаров с целью изучения возможностей методов и алгоритмов обработки георадарных данных для повышения надёжности обнаружения такого опасного дефекта технических конструкций как расслоение. В процессе обработки модельных и экспериментальных данных применялись, в первую очередь, современные теоретические методы обработки сигналов и программное обеспечение GeoVizu. В итоге установлены и проанализированы факторы, определяющие отличия и характерные особенности импульсных сигналов георадаров, которые могут использоваться для обнаружения расслоения как нарушения контакта между слоями, или обнаружения наличия тонких слоёв в составе многослойной среды. Таким образом, предложенный подход к постановке задачи совместно с проделанным теоретическим анализом и результатами численного моделирования позволили в итоге обосновать возможность повышения надёжности процедуры неразрушающего контроля качества и эффективного выявления критических дефектов в плоскостойких конструкциях с помощью методов георадиолокации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

### Authors' ORCID ID

Батраков Д.О. <http://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

Иян Ло <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

Антюфеева М.С. <http://orcid.org/0000-0002-6654-4794>

Шульга С.Н. <https://orcid.org/0000-0003-0626-4405>

Батракова А.Г. <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ground penetrating radar, theory and applications / [Jol Harry M. (Editor)]. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009, 508 p.
2. S Pochanin, G. P.; Masalov, S. A.; Ruban, V. P.; Kholod, P. V.; Batrakov, D. O.; Batrakova, A. G.; Urdzik, S. N.; Pochanin, O. G., Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. CRC Press - Taylor & Francis Group, London, 2016. P. 20-65. ISBN 9781466586574 - CAT# K20299
3. Tarefder R. A. and Ahmed M. U. Ground penetrating radar for measuring thickness of an unbound layer of a pavement. In Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, vol. 598, pp. 160–167.
4. Saarenketo T.: Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Academic dissertation, 2006, 125pages. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
5. Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo, T. Scullion // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 43. – P. 119–138.
6. Loizos A. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches./ Loizos A.; Plati C. / NDT E Int. **2007**, 40, 147–157. [CrossRef]
7. Oliveira D.B. A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data. / Oliveira D.B.; Vieira D.A.G.; Lisboa A.C.; Goulart F./ NDT E Int. **2014**, 65, 22–27. [CrossRef]
8. Dong Z. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. / Dong Z.; Ye S.; Gao Y.; Fang G.; Zhang X.; Xue Z.; Zhang T. / Sensors 2016, 16(12), 2067; <https://doi.org/10.3390/s16122067>. <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2067>
9. Batrakov D.O. Hilbert transform application to the impulse signal processing / D.O. Batrakov, A.G. Batrakova, D.V. Golovin, A.A. Simachev // «UWBUSIS'2010» : 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine : Proceedings. – Sevastopol, 2010. – P. 113–115.
10. Батраков Д.О. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и неразрушающем контроле / Д.О. Батраков // Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. – X. : ХНУ, 2016. – вип. 25. – С. 48-52. – (Серія: «Радіофізика та електроніка»)
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / М.: Наука, 1973. 720 с.
12. Batrakov, D.O., Antyufeyeva, M.S., Antyufeyev, A.V., Batrakova, A.G. UWB signal processing during thin layers thickness assessment. 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop, September 27-28, 2016, Kyiv, Ukraine, P. 36-39.
13. Sudyka J. and Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding, Int. J. Pavement Res. Technol., vol. 4, no. 3, 2011, Pp. 176-184. [http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3\\_176-184.pdf](http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf)
14. Батраков Д. О. Інформаційні технології та обробка георадарних сигналів у системі моніторингу транспортних споруд. (Розділ 3. С. 66-108) У кн. Інформаційні технології та інженерія транспортних і промислових споруд. Колективна монографія під загальною редакцією проф. Батракової А.Г., Харків, 2019, 244 с., Міносвіти і науки України, ХНАДУ, затверджено до видання Вченою Радою ХНАДУ, протокол №1, від 31. 05. 2019р. ISBN978-617-7771-45-5. ФОП Панов А. М.
15. Krysiński L. and Sudyka J. Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high- frequency ground-penetrating radar, Nondestruct. Test. Eval., vol. 27, no. 3, 2012, Pp. 219-227. [www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012).

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-04>

УДК 550.34:550.510.533

## ДОЛГОТНЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

**И.Г. Захаров, А.М. Цымбал**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: zakharov@karazin.ua*

Поступила в редакцию 24 января 2019 г.

**Актуальность.** В последние годы стало ясно, что вопросы динамики верхней атмосферы и ионосферы следует рассматривать как неотъемлемую часть климатологии атмосферы в целом. Долготные особенности параметров ионосферы обусловлены в основном влиянием на ионосферу нижележащих слоев атмосферы, а также литосферы. Благодаря этому, их исследование является эффективным инструментом изучения климатологии атмосферы, что важно для прогноза среды обитания человека и решения ряда других прикладных задач.

**Цель работы** – анализ долготных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) среднеширотной ионосферы и их возможной связи с процессами в нижней атмосфере, литосфере и геокосмосе.

**Материалы и методы.** Исследования проведены с использованием данных о ПЭС, полученным по измерениям сигналов навигационных спутников в январе 2018 года. Используются также данные о приземном атмосферном давлении на долготной цепочке метеорологических станций вблизи широты 40° N, а также данные о сейсмической активности и космической погоде. Используются метод множественного регрессионного анализа и другие статистические методы анализа.

**Результаты.** Установлены значительные долготные вариации ПЭС (в противофазе с вариациями приземного атмосферного давления), которые можно представить в виде суммы нескольких зональных мод. Рассмотрены особенности изменчивости амплитуды этих мод в зависимости от процессов в литосфере, тропосфере и геокосмосе. Установлены "критические" даты, вблизи которых взаимосвязь между процессами в различных земных оболочках значительно возрастает.

**Выводы.** Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии на ионосферу нижележащих слоев атмосферы за счет распространения вверх планетарных волн, запускающих ряд вторичных процессов на высотах нижней термосферы. Активность указанных процессов коррелирует с разностью атмосферного давления в далеко разнесенных пунктах наблюдения, что указывает на возможность трансформации локальных атмосферных возмущений в общепланетарные.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полное электронное содержание, долготные эффекты, планетарные волны.

## ДОВГОТНІ ВАРІАЦІЇ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ СЕРЕДНЬОШИРОТНОЇ ІОНОСФЕРИ

**І.Г. Захаров, А.М. Цимбал**

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

**Актуальність.** В останні роки стало ясно, що питання динаміки верхньої атмосфери і іоносфери слід розглядати як невід'ємну частину кліматології атмосфери в цілому. Довготні особливості параметрів іоносфери обумовлені в основному впливом на іоносферу нижчих шарів атмосфери, а також літосфери. Завдяки цьому їх дослідження є ефективним інструментом вивчення кліматології атмосфери, що важливо для прогнозу стану довкілля і рішення низки інших прикладних задач.

**Мета роботи** – аналіз довготних варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) середньоширотної іоносфери і їх можливий зв'язок з процесами в нижній атмосфері, літосфері та геокосмосі.

**Матеріали та методи.** Дослідження проведені з використанням даних про ПЕВ, отриманих за вимірюваннями сигналів навігаційних супутників у січні 2018 року. Використано також дані про приземний атмосферний тиск на довготному ланцюжку метеорологічних станцій поблизу широти 40° N, а також дані про сейсмічну активність і космічну погоду. Використано метод множинного регресійного аналізу та інші статистичні методи аналізу.

**Результати.** Встановлено значні довготні варіації ПЕВ (у протифазі з варіаціями приземного атмосферного тиску), які можна представити у вигляді суми декількох зональних мод. Розглянуто особливості мінливості амплітуди цих мод в залежності від процесів у літосфері, тропосфері та геокосмосі. Встановлено "критичні" дати, поблизу яких взаємозв'язок між процесами в різних земних оболонках значно зростає.

**Висновки.** Отримані результати свідчать про значний вплив на іоносферу нижчих шарів атмосфери за рахунок поширення вгору планетарних хвиль, що запускають ряд вторинних процесів на висотах нижньої термосфери. Активність зазначених процесів корелює з різницею атмосферного тиску в далеко рознесених пунктах, що вказує на можливість трансформації локальних атмосферних збурень в загальнопланетарні.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** повний електронний вміст, довготні ефекти, планетарні хвилі.

**LONGITUDINAL VARIATIONS OF THE TOTAL ELECTRONIC CONTENT OF THE MID-LATITUDE IONOSPHERE****I.G. Zakharov, A.M. Tsybal***V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

**Background:** In recent years, it has become clear that the issues of dynamics of the upper atmosphere and ionosphere should be considered as an integral part of the atmosphere climatology as a whole. The longitudinal features of the ionospheric parameters are mainly due to the effect on the ionosphere of the lower atmosphere layers, as well as the lithosphere. Thanks to this, their study is an effective tool for studying the atmosphere climatology, which is important for predicting the human environment and solving a number of other applied problems.

**Objectives** of the work is the analysis of longitudinal variations in the total electron content (TEC) of the mid-latitude ionosphere and their possible association with processes in lower atmosphere, lithosphere and geocosmos.

**Materials and methods.** The studies were carried out using data on TEC obtained from measurements of navigation satellite signals in January 2018. We also used data on surface atmospheric pressure at longitude chain of meteorological stations near latitude 40° N, as well as data on seismic activity and space weather. The method of multiple regression analysis and other statistical methods of analysis are used.

**Results.** Significant longitudinal variations in TEC (in antiphase with variations in surface atmospheric pressure) are established, which can be represented as the sum of several zonal modes. The features of amplitude variability of these modes depending on the processes in the lithosphere, troposphere and geocosmos are considered. "Critical" dates have been established, near which the relationship between processes in different earth shells increases significantly.

**Conclusions.** The results obtained indicate a significant effect on the ionosphere of lower layers of the atmosphere due to propagation of planetary waves upward, triggering a number of secondary processes at the heights of the lower thermosphere. The activity of these processes correlates with the difference in atmospheric pressure at widely spaced observation points, which indicates the possibility of the transformation of local atmospheric disturbances into planetary ones.

**KEY WORDS:** total electron content, longitudinal effects, planetary waves.

**ВВЕДЕНИЕ**

В большинстве моделей верхней атмосферы и ионосферы принимается, что изменение параметров атмосферы и ионосферы по долготе незначительны. Однако результаты измерений не подтверждают такое предположение. Определенный вклад в долготные различия на ионосферных высотах вносит несоответствие географического и геомагнитного полюсов планеты. Эти особенности очевидны для высокоширотной ионосферы и сохраняют свое значение на средних широтах [1].

Еще больших различий следует ожидать из-за существенной зависимости ветрового поля верхней атмосферы (как минимум ее нижней части) от долготы: незональность ветрового поля в нижней термосфере является принципиальной особенностью климатологии ветров на этих высотах [2]. Эта зависимость связана с региональными особенностями нижней атмосферы и зависимостью от долготы характеристик распространяющихся снизу планетарных волн, приливов и внутренних гравитационных волн [см., например, 2-4], способных проникать в нижнюю термосферу. В области F2 также установлены значительные долготные различия ионосферных параметров, несмотря на то, что проникновение на эти высоты наиболее важного типа волн – планетарных – затруднена [4-7]. Полагают, что на большие высоты эти неоднородности передаются за счет вторичных эффектов, изученных в настоящее время недостаточно [4-7]. В целом, ионосферная изменчивость, вызванная процессами в нижней атмосфере, может быть сопоставима с типичной изменчивостью, вызванной геомагнитными факторами [8]. Следовательно, есть все основания рассматривать вопросы динамики верхней атмосферы и ионосферы как неотъемлемую часть климатологии атмосферы в целом [9].

Теоретические исследования данного вопроса содержат неизбежные упрощения, которые приводят к различиям теории и эксперимента. В таких условиях представляется важным получение экспериментальных свидетельств взаимодействия разных слоев атмосферы. В качестве индикатора процессов в верхней атмосфере удобно использовать ионосферные данные, так как длительные наблюдения нейтральных параметров атмосферы на таких высотах затруднены. Дополнительные преимущества создаются при использовании данных о полном электронном содержании (ПЭС) ионосферы, полученных по измерениям сигналов навигационных спутников на наклонных трассах, что позволяет строить глобальные карты ПЭС не только над сушей, но и над акваторией без интерполяции.

Цель работы – анализ долготных вариаций ПЭС среднеширотной ионосферы и их возможной связи с процессами в нижней атмосфере, литосфере и геокосмосе.

**ДААННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

Для анализа долготных вариаций использованы глобальные карты ПЭС, которые строятся по измерениям сигналов навигационных спутников с узлами сетки с шагом 2,5° по широте, 5° по долготе и

1 час по времени. Данные картографирования в виде ежесуточных таблиц доступны на сайте <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>. В нашей работе для анализа долготных эффектов использованы данные за январь 2018 года на широте  $40^\circ$  N, которая в равной мере удалена как от авроральной, так и экваториальной зон ионосферы, имеющих существенные особенности в пространственном распределении ионосферных параметров. Ниже значения ПЭС приведены в общепринятых единицах  $\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

Для оценки процессов в нижней атмосфере использованы данные о приведенном к уровню моря атмосферном давлении ( $P_0$ ) 13 метеорологических станций (сайт [www.gismeteo.ru/diary](http://www.gismeteo.ru/diary)) вблизи широты  $40^\circ$  N: Понта-Гарса ( $25,4^\circ$  W), Валенсия ( $0,4^\circ$  W), Лечче ( $18,2^\circ$  E), Ларисса ( $22,4^\circ$  E), Бурса ( $29,1^\circ$  E), Баку ( $49,9^\circ$  E), Ташкент ( $69,2^\circ$  E), Пекин ( $116,4^\circ$  E), Пхеньян ( $125,8^\circ$  E), Акита ( $140,1^\circ$  E), Боулдер ( $105,5^\circ$  W), Канзас-Сити ( $95,6^\circ$  W), Филадельфия ( $75,2^\circ$  W). Для выделения влияний нижней атмосферы на ионосферу на фоне непрерывно влияющих факторов космической погоды, использованы данные о солнечной (плотность потока радиоизлучения Солнца  $F_{10,7}$ ) и геомагнитной (индекс  $A_p$ ) активностей с сайта <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/>. Роль литосферы рассматривалась с использованием такого понятия как глобальная сейсмическая активность (ГСА), которая оценивалась по максимальной за сутки магнитуде землетрясения ( $M_{\text{max}}$ ). Данные о землетрясениях взяты на сайте <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние долготные вариации ПЭС демонстрируют четыре максимума (Рис. 1 – отрицательные значения соответствуют западной долготе), положение которых по долготе в течение месяца оставалось почти неизменным, но постепенно менялась их амплитуда. Размах колебаний долготных вариаций ПЭС составил почти 3 TECU, или 43 % от среднего значения ПЭС за период наблюдений. Еще более поразительным являются резкие долготные градиенты ПЭС. Максимальные изменения ПЭС, превышающие во многие дни 50 % от средних значений ПЭС в данные сутки, наблюдались в интервале от Азорских островов ( $25^\circ$  W) до Европы (около  $30^\circ$  E). Подобные градиенты сопоставимы с суточными градиентами ПЭС на средних широтах. Значительные долготные градиенты параметров ионосферы (критическая частота области F2) фиксировались и ранее [см., например, 4].

Как известно, Азорским островам соответствует один из наиболее значительных и постоянно существующих максимумов атмосферного давления, что позволяет допустить связь приземного давления и процессов в ионосфере. Расчеты средних долготных вариаций  $P_0$  по данным 13 станций показали их высокое сходство (в противофазе) с долготными вариациями ПЭС (Рис. 1), особенно на долготах от Азорских островов до Европы.

Установленные крупномасштабные особенности долготных вариаций ПЭС можно представить как сумму трех гармонических функций с периодами  $2\pi$ ,  $\pi$  и  $\pi/2$ . Учитывая стабильное положение максимумов ПЭС, представляется очевидным связать их с проявлением стационарных планетарных волн (СПВ) с несколькими зональными модами:  $m = 1, 2$  и 4.

На Рис. 2 приведен пример долготных вариаций ПЭС для 27.01.2018 в круговых координатах, который дает наглядное представление об указанных модах: мода  $m = 1$  характеризует степень смещения от центра исходного круга равных значений ПЭС,  $m = 2$  – определяет его превращение в эллипс,  $m = 4$  – наличие двух перекрещивающихся "эллипсов". По результатам множественного регрессионного анализа, амплитуды мод  $m = 1, 2$  и 4 значительно превышают погрешность расчета, тогда как мода  $m = 3$  во всех случаях близка к нулю. В Таблице приведены средние за январь значения амплитуд зональных мод ПЭС и примеры для двух дней, характеризующие степень изменчивости их амплитуды. Изменчивость амплитуды мод приводит к заметному изменению формы долготных вариаций ПЭС (см. ниже Рис. 5). В среднем, моды  $m = 1, 2$  и 4 обеспечивают 32, 41 и 27 %, соответственно, вклада в долготные вариации ПЭС.

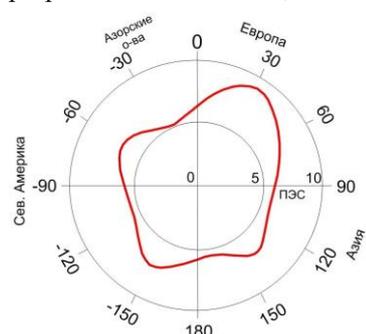


Рис. 2. Пример долготных вариаций ПЭС 27.01.2018 в круговых координатах.

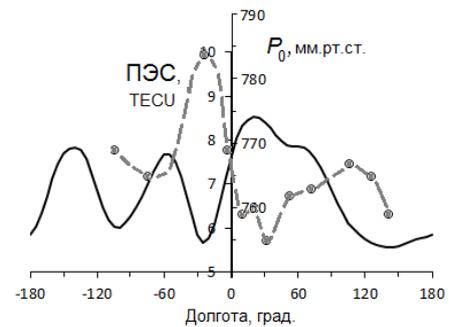


Рис. 1. Средние за месяц долготные вариации ПЭС (сплошная кривая) и атмосферного давления (пунктир) в январе 2018 г.

В отдельные дни амплитуда указанных мод, особенно  $m = 1$  и 2, меняются в значительных пределах, при этом почти всегда в противофазе друг к другу (коэффициент корреляции  $r = -0,59$ ; см. также Рис. 3). Видно, что обратная зависимость между этими модами

представлена двумя отдельными (с уровнем значимости  $p < 0,05$ ) зависимостями:

$$A_{m=2} = 1,15 - 1,31A_{m=1} \quad (S_1); \quad A_{m=2} = 0,84 - 1,46A_{m=1} \quad (S_2),$$

при почти полном отсутствии промежуточных значений. Таким образом, имеются два состояния атмосферы  $S_1$  и  $S_2$ , переход между которыми происходит, в основном, за счет резкого изменения амплитуды моды  $m = 1$ . Как известно, такие переходы характерны для нелинейных систем.

Таблица. Амплитуды зональных мод ПЭС, TECU

Дата	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	Погр. расчета
11.01.2018	6,66	0,66	0,17	0,09	0,31	$\pm 0,09$
29.01.2018	6,94	0,07	0,76	0	0,39	$\pm 0,06$
Январь 2018	6,86	0,45	0,57	0,04	0,38	$\pm 0,06$

Рассмотрим возможную роль возмущений в литосфере, атмосфере, магнитосфере и геокосмосе в изменчивости установленных долготных вариаций ПЭС ото дня ко дню. На Рис. 4 показаны (сверху вниз) изменения ото дня ко дню геомагнитной активности (ГМА), ПЭС (в среднем и на долготе  $150^\circ W$ ), амплитуда мод  $m = 1$  и  $2$  (шкала направлена вниз), разность атмосферного давления,  $\Delta P_{E-TO}$ , между Европой ( $22^\circ E$ ) и западным побережьем Тихого океана ( $140^\circ E$ ), а также ГСА ( $M_{max}$ ) в январе 2018 г. Данные о солнечной активности (СА) не рассматривались ввиду незначительных вариаций  $F_{10.7}$ , характерных для минимума 11-летнего цикла СА. Несмотря на определенные тенденции, в целом, тесных связей между приведенными характеристиками не просматривается, что указывает на отсутствие доминирующего влияния одной из геосфер на другие. Изменения ГМА также были невелики: максимальные значения  $A_p$  не достигали уровня слабых геомагнитных бурь, однако, даже таких изменений ГМА оказалось достаточно, чтобы оказать влияние на ПЭС: связь изменений указанных величин характеризуется коэффициентом корреляции  $r = +0,33$  ( $p < 0,1$ ). Механизмом такого влияния могут быть изменения меридионального ветра в термосфере при увеличении ГМА, поднимающие ионосферные слои вдоль силовых линий в зону более низкой рекомбинации. Ранее [10] также была установлена связь геомагнитными и ионосферными характеристиками при низком уровне ГМА, а в работе [11] показано, что в минимуме СА переход от длительно существовавших (не менее 7 суток) спокойных условий к магнито-возмущенным (до  $A_p \approx 15$ ) приводил к возмущениям электронной концентрации на высотах области F2 до 40 %, т.е. до уровня, характерного для средней геомагнитной возмущенности.

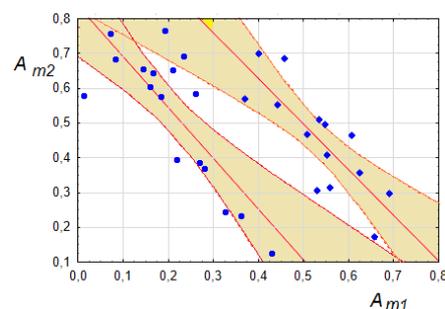


Рис. 3. Регрессионная зависимость амплитуд мод  $m = 1$  и  $m = 2$ . Выделены интервалы погрешности расчета ( $p < 0,05$ ).

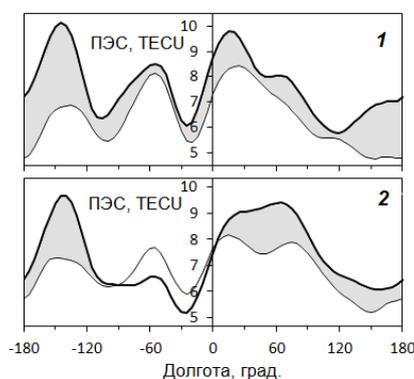
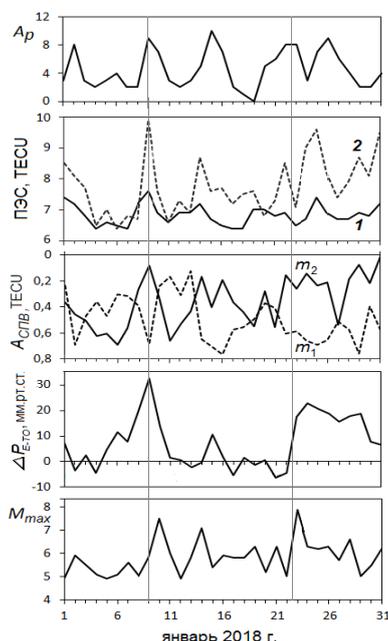


Рис. 4 (слева). Временные вариации ГМА, ПЭС (1 – средние по долготе, 2 – на долготе  $145^\circ W$ ), зональных мод ПЭС, разности давления между Европой и Азией и ГСА.

Рис. 5 (справа). Изменения ПЭС вблизи критических дат (вертикальные линии на рис. 4): 1 – 9 и 11 января, 2 – 21 и 25 января.

Несмотря на упомянутое выше отсутствие очевидных связей между рассматриваемыми

показателями, в отдельные дни с резкими изменениями их значений связь представляется более наглядной. На Рис. 4 такие резкие изменения легче всего заметить в ГСА. Видно, что 9-10 и 22-23 января (назовем эти даты критическими – см. вертикальные линии) уровень ГСА резко увеличился, после чего постепенно уменьшался на протяжении нескольких дней. Первый рост ГСА проявился наиболее сильным землетрясением (ЗТ) с магнитудой  $M = 7,5$  (координаты эпицентра  $17,5^\circ \text{ N}; 83,5^\circ \text{ W}$ ), второй – ЗТ с  $M = 7,9$  ( $56,2^\circ \text{ N}; 149,2^\circ \text{ W}$ ). В значениях ПЭС и ГМА также заметны изменения вблизи указанных дат, хотя для ГМА они были сопоставимы с изменениями в другие дни. В ПЭС, кроме увеличения средних значений вблизи критических дат, происходило заметное изменение характера долготных вариаций ПЭС за счет его роста преимущественно над европейским и особенно американским континентами (Рис. 5), что привело к резкому увеличению зональной моды  $m = 2$ .

Вблизи критических дат наиболее значительные изменения – на 25 – 35 мм. рт. ст. – претерпели не абсолютные значения, а разность атмосферного давления,  $\Delta P_{E-TO}$ , между Европой и тихоокеанским побережьем (Рис. 4), что непременно будет сопровождаться перемещением крупных воздушных масс. Таким образом, налицо значительная синхронизация процессов от литосферы до ионосферы и, возможно, до геокосмоса (в критические даты отмечается также рост  $A_p$ , хотя амплитуда максимумов в эти дни такая же, как в других максимумах  $A_p$ ), по крайней мере, вблизи выделенных критических дат. При этом одновременно реализовывалась как локальная связь (сразу в нескольких геосферах процессы были более активными в западном полушарии), так и глобальная, когда изменения ПЭС оказывались максимально сходными на противоположных частях земного шара (на долготах максимумов моды  $m = 2$ ), но могли различаться на более близких долготах.

Дополнительно наличие связей между геосферами подтверждается корреляционным анализом. Изменения ПЭС, кроме отмеченной выше связи с ГМА, характеризуются слабой положительной связью ( $r = 0,1 - 0,3$ ) с атмосферным давлением на станциях европейского и американского континентов, и такой же по величине, но отрицательной связью – с атмосферным давлением над Азией. В то же время, установлена достоверная связь между ПЭС и разностью атмосферного давления  $\Delta P_{E-TO}$  между Европой и западным побережьем Тихого океана. Отметим, что различие нагрева атмосферы над сушей и морем рассматривается как один из факторов зарождения и интенсификации СПВ [12]. Мода  $m = 1$  уменьшается при увеличении ПЭС ( $r = -0,47$ ) и  $\Delta P_{E-TO}$  ( $r = -0,46$ ), мода  $m = 2$  при этом увеличивается. Мода  $m = 2$  также пропорциональна  $A_p$  ( $r = +0,45$ ). Мода  $m = 4$  слабо меняется при изменении ПЭС и  $\Delta P_{E-TO}$ , но имеет достоверную связь с максимальной магнитудой ЗМ  $M_{max}$  ( $r = -0,45$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные расчеты и анализ указывают на наличие определенных связей между геосферами. Сложнее решить вопрос о роли влияющего фактора, обусловившего наблюдаемую синхронизацию процессов в геосферах вблизи указанных критических дат. Принимая во внимание резкие изменения одновременно или накануне роста ГСА разности давлений  $\Delta P_{E-TO}$  над участками земной поверхности, разнесенными на несколько тысяч километров, а также полученные ранее результаты о роли перемещения крупных воздушных масс в инициации подготовленных ЗТ (см., например, [10, 13, 14]), можно утверждать, что и в данном случае такая связь не случайна. Следует подчеркнуть, что речь идет не просто об изменении давления на земную поверхность при перемещении воздушных масс над очагом готовящегося ЗТ [13, 14], а о глобальном процессе. В этом случае, возможно, механизм инициации ЗТ может быть связан с изменениями параметров скорости вращения Земли, обусловленные перемещением воздушных масс. Правдоподобность данного механизма подтверждается наличием хорошо известной зависимости параметров вращения Земли от сезонных перемещений воздушных масс.

Устойчивый характер долготных вариаций ПЭС в виде суммы трех основных зональных мод не оставляет сомнений в значительном влиянии СПВ на ионосферу. При этом связь ПЭС с разностью давления  $\Delta P_{E-TO}$  более сильная, чем с давлением на любой из станций, в том числе между  $P_0$  на некоторой метеостанции и ПЭС над ней ( $r < 0,25$ ). Таким образом, первоначально локальные изменения атмосферного давления способны приводить к глобальным изменениям одновременно в нескольких геосферах, при этом СПВ выступают как один из важных элементов такой глобализации.

Как известно, формирующийся зимой страто-мезосферный циклонический вихрь с переносом воздуха с запада на восток (см., например, [15]), является благоприятным для проникновения СПВ на высоты нижней термосферы. Проникновение СПВ на большие высоты затруднено из-за преобладания на этих высотах процессов молекулярной диффузии (вместо турбулентности ниже термосферы), поэтому нейтральный газ в термосфере и ионосфере формально не вовлечен в общий процесс атмосферной циркуляции [4-9, 15]. В связи с этим рассматривают дополнительные механизмы, обеспечивающие влияние СПВ на ионосферу. В частности, показано, что опускание молекулярного газа из нижней термосферы в область активной циклонической циркуляции в мезосфере и стратосфере приводит к

увеличению отношения концентраций основных газовых составляющих  $[O^+]/[N_2]$  на высотах термосферы и, следовательно, к увеличению электронной концентрации и уменьшению высоты максимума ионизации [15]. Над областью высокого давления в антициклоне изменения противоположны. Принимая во внимание выраженную противофазность в изменении атмосферного давления и ПЭС, можно утверждать, что полученные результаты подтверждают реальность предложенного ранее [см., например, 4] механизма влияния планетарных волн на область F2 ионосферы.

### ВЫВОДЫ

1. Для условий минимума СА и зимнего сезона на средних широтах северного полушария установлены значительные долготные вариации ПЭС в противофазе с долготными вариациями приземного атмосферного давления. Максимумы и минимумы ПЭС в течение всего периода наблюдений проявлялись на одних и тех же долготах, но характеризовались значительными изменениями их амплитуды, что указывает на их связь со стационарными планетарными волнами.

2. Долготные вариации ПЭС описываются суммой трех зональных мод  $m = 1, 2$  и  $4$ , которые обеспечивают, в среднем, 32, 41 и 27 % вклада в ПЭС. Амплитуда мод  $m = 1$  и  $2$  ото дня ко дню изменяется в противофазе (коэффициент корреляции  $r = -0,59$ ); период доминирования одной из гармоник составляет 4 – 5 суток, а моменты резкой смены амплитуды коррелируют с изменениями атмосферного давления (особенно с разностью давления в Европе и на побережье Тихого океана), изменениями ПЭС и ГСА. Мода  $m = 4$  более стабильная по амплитуде и проявляет умеренную, но при этом достоверную связь с изменениями глобальной сейсмической активности ( $r = -0,45$ ).

3. Полученные результаты подтверждают предложенный ранее механизм влияния планетарных волн на электронную концентрацию ионосферы за счет изменения отношений концентраций основных газовых составляющих  $[O^+]/[N_2]$  на высотах нижней термосферы, где еще непосредственно проявляется тропо-страто-мезосферная циклоническая циркуляция.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

### Authors' ORCID ID

I.G. Zakharov  <http://orcid.org/0000-0002-3262-9984>.

A.M. Tsymlal  <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zakharov, I.G., Tyrnov O.F. A Model of the Total Columnar Electron Content in the Ionosphere for the Latitudes 25 to 70°N // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. V. 53, No. 4–5. – P. 38 – 44.
2. Kazimirovsky E.S., Vergasova G.V. The non-zonal effect in the dynamical structure of the midlatitude MLT-region // Adv. Space Res. – 2001. – V. 27, No. 10. – P. 1673–1678.
3. Kazimirovsky E.S., Manson A.H., Meek C.E. Winds and waves in the middle atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. – 1988. – V. 50, No. 3. – P. 243–250.
4. Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Лещенко В.С., Мелич Й. Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 204–215.
5. Laštovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2009. – V. 71, No. 14–15. – P. 1514–1528.
6. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, No. A2. – P. 1016. – DOI:10.1029/2001JA900126.
7. Rishbeth H. F-region links with the low atmosphere? // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2006. – V. 68. – P. 469–478.
8. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2000. – V. 62. – P. 685–693.
9. Вергасова Г.В., Кокоуров В.Д., Казимировский Э.С. Динамика ионосферы как часть климатологии атмосферы // Научно-техническая библиотека SciTecLibrary. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8002.html>.
10. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – V. 58, № 3. – P. 430 – 437.
11. Захаров И.Г., Тырнов О.Ф. Некоторые особенности суточных вариаций  $\delta f_oF_2$  среднеширотной ионосферы. Геомагнетизм и аэронавигация. – 1992. – Т. 32, № 5. – С. 182–185.

- 
12. Chen, W., Yang S., Huang R.-H. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110, D14110. – doi:10.1029/2004JD005669.
  13. Гордиец Б.Ф., Марков М.Н., Шелепин Л.А. Солнечная активность и Земля.– М.: Знание, 1980.– 64 с.
  14. Боков В.Н. Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений // *Известия РГО РАН.* – 2003. – Т. 135, вып. 6. – С. 54–65.
  15. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107, No. A2. – P. 1016. DOI:10.1029/2001JA900126.14.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-05>

УДК 621.396.671

## ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Н.Н. Горобец, А.С. Лебедев

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

Поступила в редакцию 20 февраля 2019 г.

**Актуальность.** Поведение электромагнитных волн на конечном расстоянии от многокольцевых антенных решеток в их ближней и промежуточной зонах наблюдения до настоящего времени не исследовано в достаточной для современных запросов практики степени. Для многих приложений важно знать возможности формирования прожекторного луча в ближней зоне многокольцевых антенных решеток и амплитудные, фазовые и поляризационные характеристики полей в ближней зоне при изменении электрических размеров антенны и расстояния между излучателями.

**Цель работы.** Целью работы является теоретическое исследование амплитудных и фазовых характеристик электромагнитного поля в ближней и промежуточной зонах многокольцевых плоских эквидистантных антенных решеток изотропных излучателей.

**Методы и методология.** Исследования основаны на принципе суперпозиции, методах теории функций комплексного переменного и современных методах вычислительной математики. В результате компьютерного моделирования изучено поведение электромагнитных волн в ближней зоне многокольцевых антенных решеток при изменении диаметра раскрытия антенны, расстояния между излучателями и длины рабочей волны.

**Результаты.** Разработано математическое обеспечение для расчета амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей в ближней зоне многокольцевых эквидистантных антенных решеток изотропных излучателей. Рассчитаны амплитуды и фазы вектора напряженности электрического поля при изменении диаметра раскрытия от 0,5 до 200 длин волн. Расстояние между излучателями выбиралось равным половине длины волны для классических фазированных антенных решеток, 0,9 длины волны для нефазированных решеток с глобальным максимумом КНД и 1,23 длины волны для нефазированных решеток с глобальным минимумом КНД. Показано, что при диаметрах раскрытия, меньших 1 – 1,5 длины волны, амплитуда поля в направлении нормали к раскрытию с увеличением расстояния уменьшается монотонно, что характерно для линейных решеток. При больших диаметрах апертуры в ближней зоне образуется прожекторный луч, в котором имеют место большие осцилляции амплитуды поля («мертвые зоны» в ближней зоне антенны). Обнаружено явление аномального увеличения амплитуды поля вне прожекторного луча в ближней зоне разреженных кольцевых решеток.

**Выводы.** Разработанное математическое обеспечение решения задачи нахождения характеристик электромагнитных полей в ближней зоне многокольцевых антенных решеток, полученные результаты и обнаруженные физические закономерности поведения полей необходимо учитывать при создании радиоэлектронных устройств и систем, в которых используются электромагнитные поля в ближней зоне антенн. Результаты статьи могут быть обобщены на случай многокольцевых и других решеток слабонаправленных излучателей любого известного типа.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электромагнитные поля; кольцевые антенные решетки; ближняя, промежуточная, дальняя зона; прожекторный луч.

## ПОЛЯ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ БАГАТОКІЛЬЦЕВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК З ДОВІЛЬНОЮ ВІДСТАННЮ МІЖ ВИПРОМІНЮВАЧАМИ

М.М. Горобець, А.С. Лебедев

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

**Актуальність.** Поведінка електромагнітних хвиль на кінцевій відстані від багатокільцевих антенних решіток в їх ближній і проміжній зонах спостереження до теперішнього часу не досліджено в достатній для сучасних запитів практики ступені. Для безлічі додатків важливо знати умови формування прожекторного променя в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток і амплітудні, фазові та поляризаційні характеристики полів в ближній зоні при зміні електричних розмірів антени і відстані між випромінювачами.

**Мета роботи.** Метою роботи є теоретичне дослідження амплітудних і фазових характеристик електромагнітного поля в ближній і проміжній зонах багатокільцевих плоских еквідистантних антенних решіток ізотропних випромінювачів.

**Методи та методологія.** Дослідження засновані на принципі суперпозиції, методах теорії функцій комплексного змінного і сучасних методах обчислювальної математики. В результаті комп'ютерного моделювання вивчено поведінку електромагнітних хвиль в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток при зміні діаметра розкрива антени, відстані між випромінювачами і довжини робочої хвилі.

**Результати.** Розроблено математичне забезпечення для розрахунку амплітудних і фазових характеристик електромагнітних полів в ближній зоні багатокільцевих еквідистантних антенних решіток ізотропних випромінювачів. Розраховані амплітуди і фази вектора напруженості електричного поля при зміні діаметра розкрива від 0,5 до 200 довжин хвиль. Відстань між випромінювачами вибиралася рівною половині довжини хвилі для класичних фазованих антенних решіток, 0,9 довжини хвилі для нефазованих решіток із глобальним максимумом КСД і 1,23 довжини хвилі для нефазованих решіток із глобальним мінімумом КСД. Показано, що при діаметрах розкриву, менших 1 - 1,5 довжини хвилі, амплітуда поля в напрямку нормалі до розкриву зі збільшенням відстані зменшується монотонно, що характерно для лінійних решіток. При великих діаметрах апертури в ближній зоні утворюється прожекторний промінь, в якому мають місце великі осциляції амплітуди поля («мертві зони» в ближній зоні антени). Виявлено явище аномального збільшення амплітуди поля поза прожекторним променем в ближній зоні розріджених кільцевих решіток.

**Висновки.** Розроблено математичне забезпечення вирішення задачі знаходження характеристик електромагнітних полів в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток, отримані результати і виявлені фізичні закономірності поведінки полів необхідно враховувати при створенні радіоелектронних пристроїв і систем, в яких використовуються електромагнітні поля в ближній зоні антен. Результати статті можуть бути узагальнені на випадок багатокільцевих і інших решіток слабкоспрямованих випромінювачів будь-якого відомого типу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** електромагнітні поля; кільцеві антенні решітки; ближня, проміжна, дальня зона; прожекторний промінь.

## FIELDS IN THE NEAR ZONE OF THE MULTIPLE RING ANTENNA ARRAYS WITH ARBITRARY DISTANCE BETWEEN RADIATORS

N.N. Gorobets, A.S. Lebedev

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

**Background.** The behavior of electromagnetic waves at a finite distance from multi-ring antenna arrays in their near and intermediate observation zones has not yet been studied to a degree sufficient for modern practice queries. For many applications, it is important to know the formation of the searchlight beam in the near zone of multi-ring antenna arrays and the amplitude, phase, and polarization characteristics of the fields in the near field when the electrical dimensions of the antenna and the distance between the radiators change.

**Objectives:** The aim of the work is a theoretical study of the amplitude and phase characteristics of the electromagnetic field in the near and intermediate zones of multi-ring flat equidistant antenna arrays of isotropic radiators.

**Methods and methodology** Research is based on the principle of superposition, methods of the theory of functions of a complex variable, and modern methods of computational mathematics. As a result of computer simulation, when changing the diameter of the aperture of the antenna, the distance between the radiators and the length of the working wave, the behavior of electromagnetic waves in the near zone of multi-ring antenna arrays is studied.

**Results:** The software has been developed for calculating the amplitude and phase characteristics of electromagnetic fields in the near zone of multi-ring equidistant antenna arrays of isotropic radiators. The amplitudes and phases of the electric field vector are calculated with a change in the aperture diameter from 0.5 to 200 wavelengths. The distance between the radiators was chosen equal to half the wavelength for classical phased antenna arrays, 0.9 wavelength for unphased arrays with a global maximum gain and 1.23 wavelength for unphased arrays with a global minimum gain. It is shown that for aperture diameters smaller than 1 - 1.5 wavelengths, the field amplitude in the direction normal to the aperture decreases monotonously with increasing distance, which is typical for linear gratings. With large aperture diameters, a spotlight beam is formed in the near zone, in which large field amplitude oscillations take place ("dead zones" in the near zone of the antenna). The phenomenon of an abnormal increase in the field amplitude outside the searchlight beam in the near zone of rarefied ring gratings was discovered.

**Conclusions:** The developed software for solving the problem of finding of the characteristic electromagnetic fields in the near zone of multi-ring antenna arrays, the results obtained and the discovered physical laws of field behavior must be taken into account when creating electronic devices and systems that use electromagnetic fields in the near zone of antennas. The results of the paper can be generalized to the case of multi-ring and other arrays of weakly directed radiators of any known type.

**KEYWORDS:** electromagnetic fields; ring antenna arrays; near, intermediate, far zone; searchlight beam

## ВВЕДЕНИЕ

Кольцевые антенные решетки находят широкое и разнообразное применение в различных областях радиоэлектроники. Это обусловлено, прежде всего, удобной конструкцией антенны с круговой апертурой, ее высокими эксплуатационными характеристиками, высокими характеристиками направленности и низким уровнем боковых лепестков во всем пространстве (а не только в главных плоскостях) наблюдения. Для понимания физики явлений в отношении последнего, очень важного для

практики обстоятельства, обычно кольцевую решетку излучателей в каждой плоскости наблюдения  $\varphi = const$  представляют эквивалентной линейной решеткой. Легко убедиться, что эквивалентная линейная решетка в любой плоскости наблюдения: а) неэквидистантна; б) имеет спадающее к краям амплитудное распределение источников поля на раскрыве даже в случае равномерного возбуждения кольцевых решеток; в) фазовое распределение поля на раскрыве постоянно. Все эти особенности формирования пространственного распределения излучения кольцевых решеток приводят к уменьшению уровня боковых лепестков диаграммы направленности.

К настоящему времени электромагнитные поля и волны на конечном расстоянии от раскрыва кольцевых дискретных и непрерывных антенн и их пространственное распределение в ближней и промежуточной зоне антенны в достаточной для практики степени не изучено. В частности, в [1] показано, что при размерах раскрыва любой формы, не превышающих  $1 - 1,5$  длины волны, амплитуды векторов напряженности электрического и магнитного полей в ближней зоне по мере увеличения расстояния от излучателя убывают равномерно. В [2] показано, что непрерывные апертурные антенны с раскрывом круглой формы при диаметрах, больших  $1 - 1,5$  длины волны, в ближней зоне формируют так называемый «прожекторный луч». Он представляет собой совокупность параллельных друг другу лучей в направлении главного максимума диаграммы направленности антенны, которая описывается плоской локальной слабо неоднородной бегущей волной. Протяженность и конфигурация прожекторного луча в пространстве определяется прежде всего электрическими размерами и формой излучающего раскрыва антенны, а также амплитудным и фазовым распределением источников излучения в раскрыве. В поперечных сечениях форма прожекторного луча вблизи антенны в большей или меньшей степени близка к форме и размерам раскрыва. В прожекторном луче сосредоточена почти вся мощность излучения антенны.

Целью настоящей статьи является теоретическое исследование физических закономерностей формирования амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей кольцевых антенных решеток изотропных излучателей в их ближней и промежуточной зонах наблюдения при изменении размеров, расстояния между излучателями или длины рабочей волны.

### ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи – выявления самых общих закономерностей формирования пространственного распределения электромагнитного поля в ближней и промежуточной зонах наблюдения апертурных антенных решеток с раскрывом круглой формы: задачу упростим и сведем к самой простой физико-математической модели. В соответствии с принципом суперпозиции амплитуду и фазу векторов напряженности электрического и магнитного полей в каждой точке наблюдения будем определять из суммы комплексных амплитуд полей каждого излучателя в соответствующей точке наблюдения:

$$\dot{E}(\vec{R}) = \sum_{n=-N}^N \dot{E}_n(\vec{R}); \quad \dot{H}(\vec{R}) = \sum_{n=-N}^N \dot{H}_n(\vec{R}).$$

При этом будем учитывать состояние поляризации излучения каждого элемента решетки исследуемой антенны. Наиболее просто это сделать, разложив вектора электрического и магнитного полей каждого излучателя решетки в каждой точке наблюдения вне антенны в ортогональном трехмерном линейнополяризованном базисе. Таким образом будут адекватно учтены продольные компоненты электрического и магнитного полей в произвольной точке наблюдения в ближней и промежуточной зонах антенны. Отметим, что в исследуемом случае синфазных антенных решеток в направлении нормали к раскрыву антенны продольные компоненты и электрического и магнитного полей равны нулю при любом расстоянии точки наблюдения от раскрыва.

Для дальнейшего упрощения задачи и обеспечения наибольшей общности ее решения аналогично [3] примем в качестве излучателя – элемента решетки – точечный изотропный излучатель, электрические и магнитные поля которого описываются однородной сферической волной. Поляризацию его излучения примем для определенности линейной вертикальной. Взаимное влияние излучателей в решетке примем пренебрежительно малым. Амплитудное и фазовое распределение поля в раскрыве антенны примем постоянным. При этих предположениях результаты расчетов амплитуд, фаз и состояния поляризации электрического и магнитного полей в точках наблюдения на конечных расстояниях от антенны позволят изучить закономерности формирования прожекторного луча, его протяженность и конфигурацию в зависимости от электрических размеров раскрыва, числа излучателей и расстояния между ними.

## ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ РЕШЕТОК МАЛЫХ И СРЕДНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ АПЕРТУРЫ

Исследование пространственного распределения амплитуд и фаз векторов напряженности электрических и магнитных полей и, в соответствии с теоремой Пойнтинга, мощности электромагнитного поля в ближней зоне кольцевых антенных решеток с малым числом излучателей и, следовательно, малых и средних электрических размеров диаметра излучающего раскрыва, имеет большое значение для практики, так как подобные решетки слабонаправленных антенн широко используются в качестве контактных и бесконтактных датчиков электромагнитных излучений в медицинском и биомедицинском приборостроении, в устройствах контроля технологических процессов в промышленности и в СВЧ – энергетике. При этом необходимо принимать во внимание тот факт, что для получения высокого пространственного разрешения информационных сигналов на больших расстояниях в дальней зоне антенны должны иметь как можно большие электрические размеры. В случае же необходимости работы на малых расстояниях - чем меньше физические размеры антенны-датчика электрического и/или магнитного поля, тем выше пространственное разрешение подобных радиоэлектронных систем. Очевидно, что в последнем случае для увеличения мощности полезного сигнала и повышения чувствительности радиоэлектронных систем можно использовать антенные решетки с небольшим количеством излучателей.

Поля в ближней зоне антенных решеток малых и средних электрических размеров необходимо знать для создания радиолокаторов ближнего действия для предупреждения столкновений наземного и водного транспорта, для технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте, в офисных и кампусных телекоммуникационных сетях. Теория полей в ближней зоне малоэлементных решеток особенно важна в подповерхностной радиолокации на основе сверхширокополосных видеоимпульсных сигналов.

Для решения поставленных задач разработанное математическое обеспечение – расчетные формулы, алгоритмы и компьютерные программы [3] – развито на случай плоских антенных решеток с известным способом расположения излучателей на плоской поверхности заданой формы и с известным амплитудным и фазовым распределением источников электромагнитного поля на раскрыве. На электрические размеры раскрыва, число излучателей, расстояния между ними, а также на форму апертуры, амплитудное и фазовое распределение токов или полей в раскрыве не накладывается никаких ограничений.

Для проверки достоверности и точности разработанного математического обеспечения проведены расчеты амплитудных и фазовых характеристик полей в сферических и декартовых координатах на расстоянии дальней зоны антенны для нескольких вариантов размеров раскрыва (от 0,5 до 200 длин волн) и расстояния между излучателями (от 0,5 до 2 длин волн). В результате оказалось, что для направления нормали к раскрыву при его синфазном возбуждении поперечные компоненты поля во всех вариантах расчетов совпадают, а продольные равны нулю. Распределение полей в зависимости от угловых координат точек наблюдения в сферической системе координат в дальней зоне совпадает с диаграммой направленности антенны.

Рассмотрим электрическое поле на малых расстояниях от линейных и плоских эквидистантных однородных синфазных антенных решеток изотропных излучателей. Примем, как и ранее в [3], что каждый элемент решетки излучает сферическую волну. В каждой точке наблюдения электрические и магнитные поля синфазны. Поля в каждом излучателе одинаковы и имеют амплитуду  $E_0$ . Поля в каждой точке наблюдения находим суммированием комплексных амплитуд полей каждого излучателя-элемента решетки в этой точке.

На Рис. 1 представлены расчеты зависимости амплитуды вектора напряженности электрического поля излучения кольцевой решетки из четырех изотропных излучателей от расстояния до точки наблюдения в направлении нормали к раскрыву. Подчеркнем, что это направление совпадает с направлением главного максимума диаграмм направленности исследуемых решеток. Расстояния между ближайшими излучателями приняты равными 0,5, 0,72 и 1,23 длины волны. В первом случае, как хорошо известно, характеристики направленности антенных решеток практически совпадают с одноименными характеристиками непрерывных антенн. Во втором при  $d = 0,72\lambda$ , как показано в [4], исследуемые решетки обеспечивают глобальный максимум коэффициента направленного действия антенны. В третьем случае при  $d = 1,23\lambda$  исследуемые решетки имеют глобальный минимум КНД (эффект "ослепления" нефазированных антенных решеток).

Из Рис. 1 видно, что в случае кольцевых антенных решеток минимальных возможных диаметров, как и в случае непрерывных плоских апертурных антенн с раскрывом круглой формы при тех же

диаметрах раскрыва (см. Рис 1а в [2]), амплитуда электрического поля максимальна непосредственно вблизи раскрыва антенны и убывает равномерно по мере удаления точки наблюдения от раскрыва. В отличие же от непрерывных апертур малых электрических размеров максимальная амплитуда поля

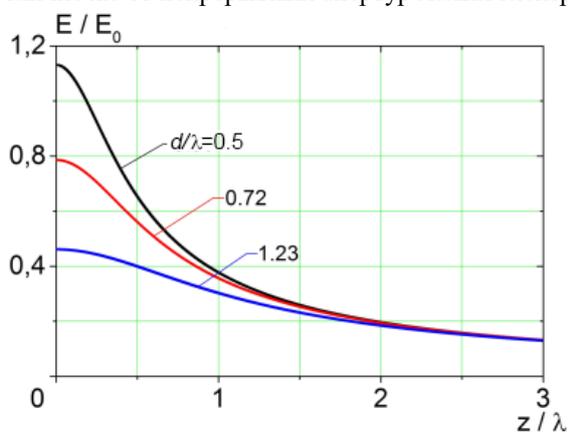


Рис. 1. Зависимость амплитуды поля кольцевой решетки 4-х излучателей от расстояния в направлении нормали к раскрыву.

вблизи решетки тем меньше, чем больше расстояние между излучателями, т.е. чем больший диаметр апертуры решетки. При этом скорость увеличения амплитуды поля по мере приближения точек наблюдения к антенне, следовательно, продольный градиент амплитуды поля антенных решеток, меньше, чем у непрерывных антенн.

От линейных антенных решеток больших электрических размеров с большим числом излучателей, поля в ближней зоне которых исследованы в [3], полученные результаты отличаются качественно: в случае линейных решеток зависимость амплитуды электрического поля от расстояния представляет собой суперпозицию плавной монотонно убывающей функции, как и в случае малоэлементных круговых антенных решеток, и осциллирующей

функции. При этом (см. Рис. 1 в [3]) число осцилляций и размах их амплитуд тем больше, чем больше длина линейной антенной решетки и расстояние между излучателями. Расчеты зависимости относительной амплитуды  $E/E_0$  и фазы  $\varphi - \varphi_0$  от поперечных координат  $x/\lambda$  и  $y/\lambda$  на разных расстояниях  $z/\lambda$  от антенны подтвердили вывод, что в ближней зоне кольцевых антенных решеток прожекторный луч не формируется. Отметим, что при увеличении  $d/\lambda$  до 1.23 признаки начала формирования прожекторного луча появляются, в частности, появляется осциллирующий характер зависимости амплитуды поля от поперечных координат.

### ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ МНОГОКОЛЬЦЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ АПЕРТУРЫ

Многоэлементные остронаправленные антенные решетки слабонаправленных излучателей находят широкое применение в качестве фазированных антенных решеток с электрически «мгновенно» управляемым положением главного максимума диаграммы направленности [5] в радиолокации, в качестве антенн радиотехнических систем различного функционального назначения для летательных аппаратов и транспортных средств, «искусственной луны» в радиоастрономических и антенных измерениях и множестве других применений. Применение антенных решеток для облучения каких-либо объектов в их ближней зоне перспективно не только из-за их удобной плоской конструкции, но и из-за возможности увеличения мощности излучаемого электромагнитного поля путем включения в каждый элемент решетки усилителя мощности.

По-видимому, впервые поля в ближней зоне апертурных антенн с круглым раскрывом исследованы в [6]. Однако исследования физических закономерностей формирования распределения амплитуд электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля, их фазовых характеристик, поляризации и мощности на конечном расстоянии в ближней и промежуточной зонах наблюдения антенны в [6] не проводились. Это обусловлено тем, что такие исследования, особенно на весьма малых расстояниях от апертуры, возможны только численно. Результаты довольно подробных исследований в случае непрерывных круглых апертур произвольных электрических размеров приведены в [2]. В [2] показано, что в ближней зоне однородных синфазных антенн прожекторный луч формируется только в случае, когда диаметр раскрыва превышает 1 – 1,5 длины волны. Зависимости амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей от расстояния до точки наблюдения в направлении нормали к раскрыву имеет осциллирующий характер. При этом средняя амплитуда полей в прожекторном луче равна амплитудам полей  $E_0$  и  $H_0$  в середине раскрыва независимо от его диаметра. В глобальном максимуме поля апертуры диаметром 100 длин волн амплитуды полей в ближней зоне достигают удвоенного их значения в середине раскрыва (на расстоянии 25 диаметров раскрыва). В глобальном минимуме на расстоянии 12,5 диаметров раскрыва амплитуда поля уменьшается на -53дБ от его значения в центре раскрыва  $E_0$ .

Очевидно, что эти проявления эффектов ближней зоны будут иметь место и в случае кольцевых антенных решеток реальных слабонаправленных излучателей, однако влияние расстояния между излучателями и их числа, определяющего электрические размеры апертуры, на распределение амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик электромагнитных полей в ближней зоне требует дополнительного исследования.

Расчеты проведены при следующих предположениях, значительно упрощающих физико-математическую модель ближней зоны антенных решеток больших электрических размеров:

- эффекты ближней зоны каждого излучателя - элемента антенной решетки не учитываются, в частности, электрическое и магнитное поля приняты поперечными и синфазными, а отношение их амплитуд, имеющее физический смысл волнового сопротивления пространства в ближней зоне, постоянно;

- каждый излучатель – элемент решетки изотропный;
- поляризация излучения каждого излучателя линейная и для определенности принято, что вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости  $XOZ$ .

Для решения задачи в общем виде с антенной свяжем декартову и сферическую системы координат, причем начало координат расположим в центре раскрыва, раскрыв расположим в плоскости  $XOY$ , а ось  $OZ$  направим по внешней нормали к раскрыву. Амплитудные и фазовые распределения полей или токов в каждом излучателе в раскрыве примем постоянными. Все линейные размеры антенны, координаты излучателей и точек наблюдения определяются в долях длины волны.

Для изучения динамики формирования прожекторного луча при изменении числа излучателей, расстояния между ними и электрических размеров раскрыва антенны рассчитывались амплитуды и фазы вектора напряженности электрического поля в направлении нормали к раскрыву и на поперечных плоскостях для вариантов диаметров однородных кольцевых антенных решеток, примерно равных 2; 5; 10; 25; 50; 100 и 200 длин волн. Решетки моделировались так, чтобы расстояния от каждого излучателя до ближайших к нему излучателей были одинаковыми. Конкретно задавались расстояния  $d=0,5$  длины волны - то есть для классических фазированных антенных решеток;  $d=0,9$  длин волны - для нефазированных разреженных антенных решеток, которые обеспечивают глобальный максимум достижимого коэффициента направленного действия и коэффициента усиления и  $d=1,1$  длины волны, при котором имеет место эффект "ослепления" нефазированных антенных решеток [4], как и в случае кольцевых антенных решеток малых электрических размеров. Отметим, что как показали расчеты, при малых электрических размерах раскрыва глобальный максимум КНД имеет место при меньших расстояниях между излучателями  $d=0,72\lambda$ , а глобальный минимум – при больших расстояниях  $d=1,23\lambda$ .

Отметим также, что из-за четкой определенности геометрической конфигурации антенных решеток и одновременно однозначно заданного расстояния между излучателями не удастся обеспечить одинаковые значения диаметра излучающего раскрыва антенны при разных расстояниях между излучателями. Поэтому брались ближайшие из возможных. Например, для диаметра раскрыва 100 длин волн при расстоянии между излучателями  $d=0,9\lambda$  ближайший диаметр раскрыва оказался равным 100,8 длины волны, а при  $d=1,1\lambda$  - равным 101,2 длины волны. Число излучателей в решетках изменялось соответственно. Например, при том же диаметре раскрыва 100 длин волн при  $d=0,5\lambda$  число излучателей  $N=30301$ , при  $d=0,9\lambda$  –  $N=9577$  и при  $d=1,1\lambda$  –  $N=6487$ . В первом случае все излучатели располагались на 100 окружностях, во втором – на 56 и в третьем – на 46.

Типичные результаты расчетов зависимости амплитуды электрического поля, отнесенной к ее значению в центре раскрыва  $E_0$ , от продольной координаты  $z/\lambda$  и зависимостей относительных амплитуд и разности фаз полей в произвольной точке наблюдения и соответствующих расстояниях вдоль оси  $Oz$  от поперечной координаты  $x/\lambda$  в случае диаметра раскрыва 100 длин волн и расстояния между излучателями в решетке  $d=0,5\lambda$  представлено на Рис. 2, 3.

Из приведенных результатов расчетов, как и из расчетов при других диаметрах раскрыва, следует, что при диаметре апертуры, большем двух длин волн, апертурные эквидистантные синфазные антенные решетки в ближней зоне формируют прожекторный луч, в котором электромагнитная волна имеет характер локальной слабо неоднородной плоской волны. В процессе распространения средняя амплитуда поля, которая определяется числом излучателей, незначительно уменьшается. Заметим, что в случае непрерывных апертурных антенн с раскрывом круглой формы средняя амплитуда поля в прожекторном луче равна амплитуде поля в центре раскрыва независимо от его электрических размеров [2].

Из результатов расчетов оказалось также, что протяженность области осцилляций и число осцилляций амплитуды поля в направлении нормали к раскрыву определяется диаметром апертуры  $D/\lambda$  и не зависит от расстояния между излучателями  $d/\lambda$ , числа излучателей и амплитудного распределения источников поля в апертуре. При этом число осцилляций поля в ближней зоне равняется числу длин волн, которые укладываются в диаметре раскрыва антенны. Принципиальным отличием поля в прожекторном луче антенных решеток с раскрывом круглой формы от других вариантов формы

раскрыва - линейной, квазилинейной, прямоугольной и квадратной - является очень большая глубина осцилляций, то есть очень большая величина продольных градиентов амплитуды векторов поля.

Качественно характер поля в ближней зоне при увеличении диаметра антенны сохраняется, однако появляются и новые эффекты:

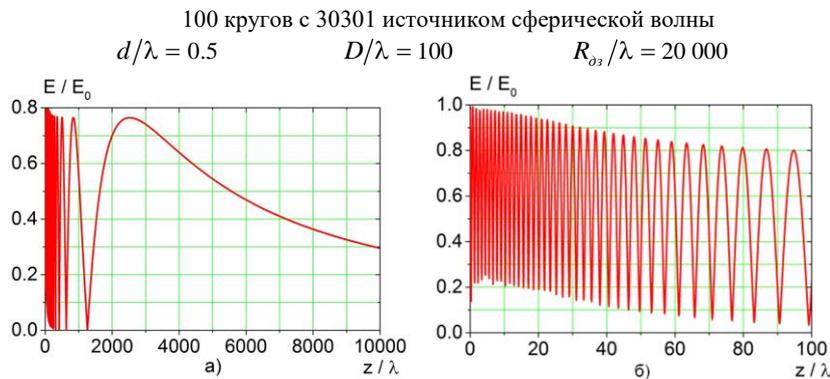


Рис. 2. Зависимость амплитуды поля решетки ( $d = 0.5\lambda$ ) с круглым раскрывом с диаметром  $100\lambda$  от расстояния в направлении нормали к раскрыву: а) - до расстояния половины расстояния дальней зоны; б) - до расстояния, равного размеру раскрыва

100 кругов с 30301 источником сферической волны.

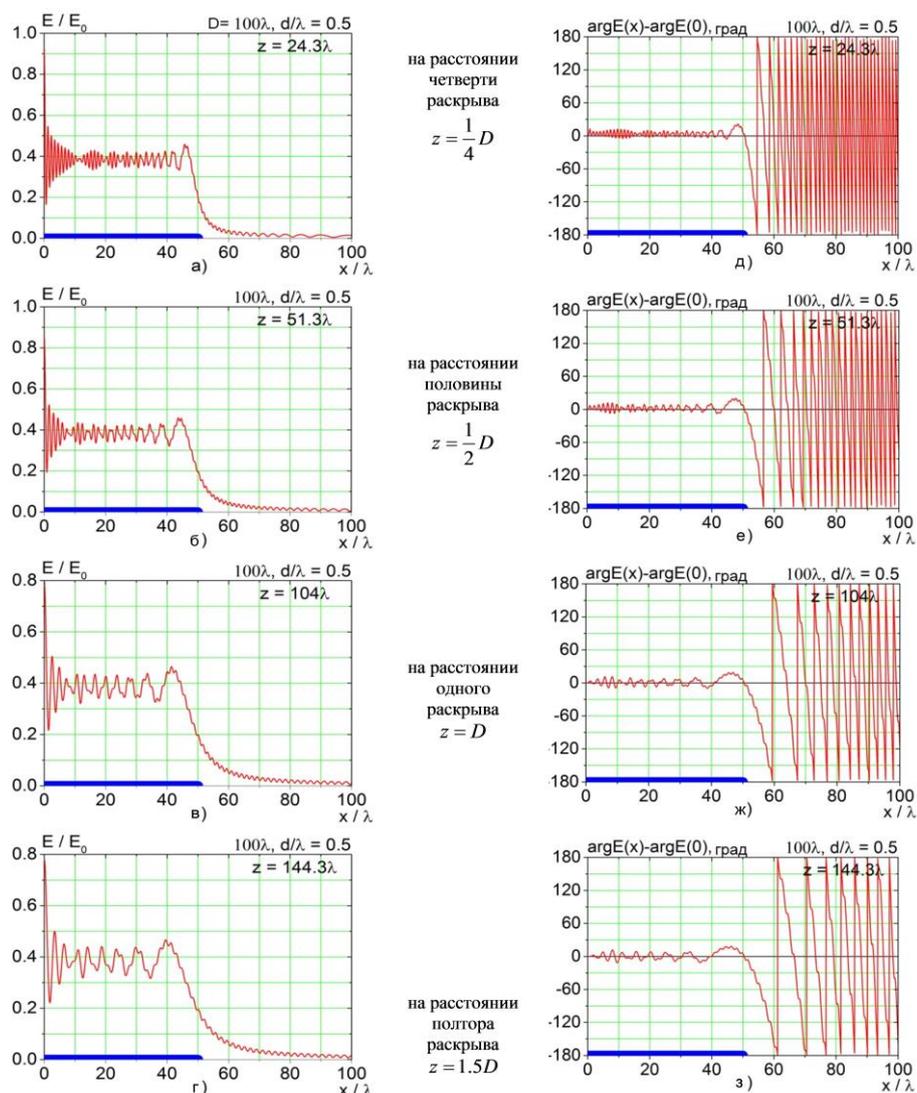


Рис. 3. Зависимость амплитуды и фазы поля решетки ( $d = 0.5\lambda$ ) с круглым раскрывом  $100\lambda$  от поперечной координаты  $x$  на разных расстояниях  $z$  от раскрыва антенны.

1. Увеличение диаметра антенны приводит к уменьшению амплитуды поля в его минимумах. Следовательно, в ближней зоне радиолокационных и телекоммуникационных радиоэлектронных систем с многокольцевыми антенными решетками образуются «мертвые зоны», которые необходимо учитывать на практике.

2. Протяженность прожекторного луча и области осцилляций амплитуды и мощности электромагнитного поля увеличивается с увеличением диаметра раскрытия антенных решеток приблизительно по квадратичному закону.

Рассмотрим далее особенности распределения амплитуд и фаз электромагнитных полей в пространстве в ближней зоне эквидистантных синфазных многокольцевых антенных решеток изотропных излучателей при изменении их диаметра и расстояния между излучателями. Расчеты, аналогичные представленным выше, проведены для диаметров раскрытия решеток от 2 до 200 длин волн при изменении расстояния между ближайшими излучателями от 0,5 до 2,0 длин волн. На Рис 4, 5 приведены расчеты распределения амплитуды и фазы электрического поля в ближней зоне наиболее важного для практики случая разреженной нефазированной эквидистантной антенной решетки с максимальным достижимым коэффициентом направленного действия при расстоянии между излучателями  $d=0,9\lambda$ . На Рис. 6, 7 приведены такие же расчеты для разреженной решетки при  $d=1,1\lambda$ . В этом случае, как показано в [4], КНД антенной решетки уменьшается за счет возникающих в пределах видимых углов дифракционных лепестков диаграммы направленности до минимального возможного значения. Как было отмечено выше, в расчетных вариантах антенных решеток диаметр раскрытия был выбран максимально близким к заданому  $D=100\lambda$ .

Из результатов расчетов, в частности, из Рис. 4 – 7 видно, что в зависимости от расстояния от антенны до текущих точек наблюдения в ближней зоне амплитуда электрического поля изменяется по осциллирующим закономерностям, как и в случае фазированных кольцевых решеток (Рис. 2, 3) и непрерывных апертурных антенн с раскрытием круглой формы [2]. При этом, как и ранее, по мере удаления точки наблюдения от раскрытия, период осцилляций увеличивается. Объясняется это тем, что в любой точке наблюдения в ближней зоне антенной решетки амплитуда поля есть суммарный эффект интерференции электромагнитных волн, излученных каждым элементом решетки. При этом, как и ранее, по мере удаления точки наблюдения от раскрытия, период осцилляций увеличивается. Размах осцилляций в зависимости амплитуды поля от продольной координаты  $z$  в направлении нормали к раскрытию, т.е. продольные градиенты амплитуды поля, в рассматриваемых случаях довольно большие, близкие к градиентам поля в ближней зоне непрерывных апертурных антенн с круглым раскрытием, исследованным в [2]. Существенные отличия в поведении поля имеют место непосредственно вблизи раскрытия антенной решетки. Из Рис. 2, 4, 6 видно, что амплитуда поля вблизи решетки уменьшается не только в минимумах поля, но и в его максимумах. Расчеты показали, что зависимости  $E(z/\lambda)$ , близкие к характерным для прожекторного луча без значительного изменения максимальных уровней амплитуды поля при увеличении расстояния, имеют место на расстояниях, больших диаметра раскрытия. Распределения амплитуды и фазы поля в поперечных сечениях  $z = const$  при изменении расстояния между излучателями от 0,5 до 0,9 длины волны такие же, как в прожекторном луче (см. Рис. 3, 5). Заметим, что такие же зависимости имеют место и в случае линейных антенных решеток [3].

Рассмотрим далее поведение поля в ближней зоне разреженной антенной решетки при увеличении расстояния между излучателями больше одной длины волны, когда в диаграмме направленности в области реальных углов наблюдения появляются первые дифракционные лепестки. На Рис. 6, 7 представлены соответствующие расчеты в случае  $d = 1,1\lambda$ , из которых следуют важные для практики выводы:

1. В разреженных кольцевых антенных решетках мощность электромагнитного поля в ближней зоне концентрируется непосредственно вблизи раскрытия антенны как в случае линейных непрерывных и дискретных антенн, в отличие от непрерывных антенн с раскрытием круглой формы, в которых мощность концентрируется на существенном расстоянии от раскрытия [2].

2. На малых расстояниях от раскрытия разреженной решетки (не больше  $0,25 D/\lambda$ ), как видно из Рис. 6б, амплитуда поля увеличивается почти в 9 раз по сравнению с амплитудой поля на излучателях.

Это явление «псевдофокусировки» электромагнитных полей в ближней зоне кольцевых разреженных антенных решеток может привести к электрическому пробое антенны, перегреву материальной среды в некоторой локальной области и другим нежелательным явлениям, поэтому должно учитываться на практике. В поперечных плоскостях на малых расстояниях от раскрытия поле переменноразное (Рис. 7д), а его амплитуда в зависимости от поперечной координаты изменяется по нерегулярным осциллирующим закономерностям (Рис. 7а).

56 кругов с 9577 источниками сферической волны  
 $d/\lambda = 0.9$        $D/\lambda = 100.8$        $R_{03}/\lambda = 20\ 321$

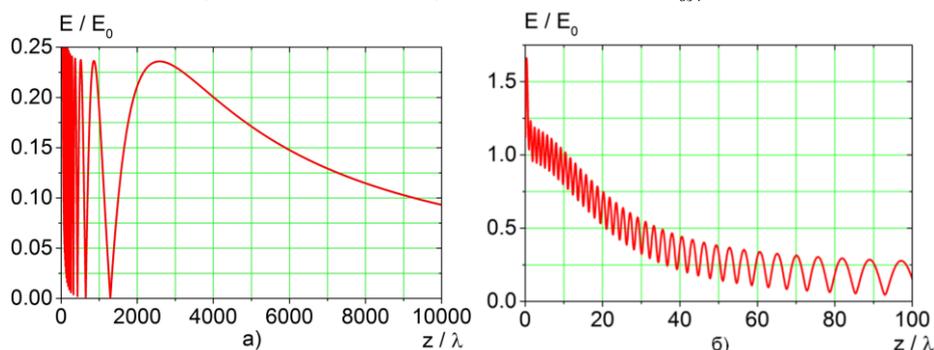


Рис. 4. Зависимость амплитуды поля решетки ( $d = 0.9\lambda$ ) с круглым раскрытием с диаметром  $100\lambda$  от расстояния в направлении нормали к раскрытию: а) – до половины расстояния дальней зоны ; б) - до расстояния, равного размеру раскрытия

56 кругов с 9577 источниками сферической волны.

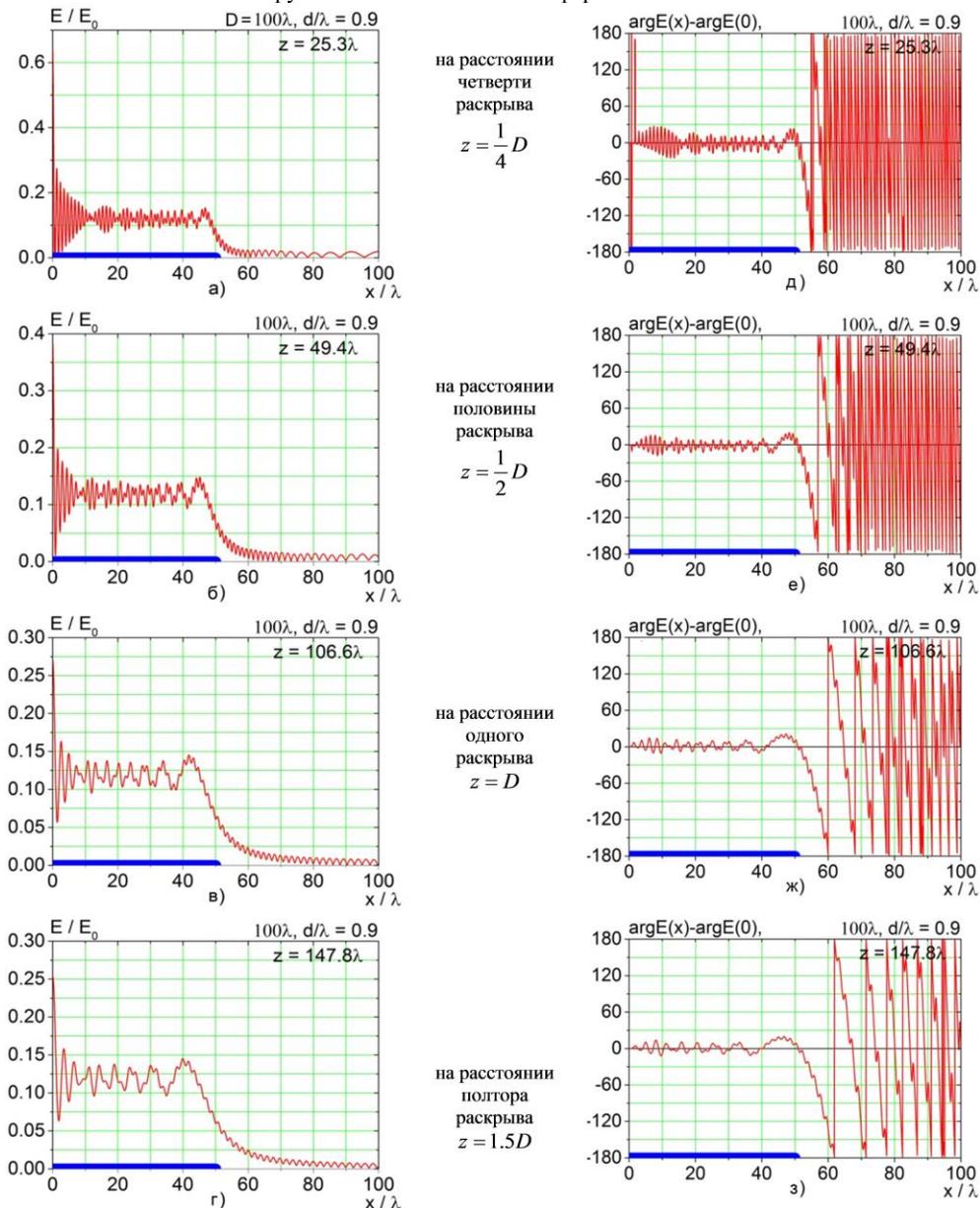


Рис. 5. Зависимость амплитуды и фазы поля решетки ( $d = 0.9\lambda$ ) с круглым раскрытием  $100\lambda$  от поперечной координаты  $x$  на разных расстояниях  $z$  от раскрытия антенны.

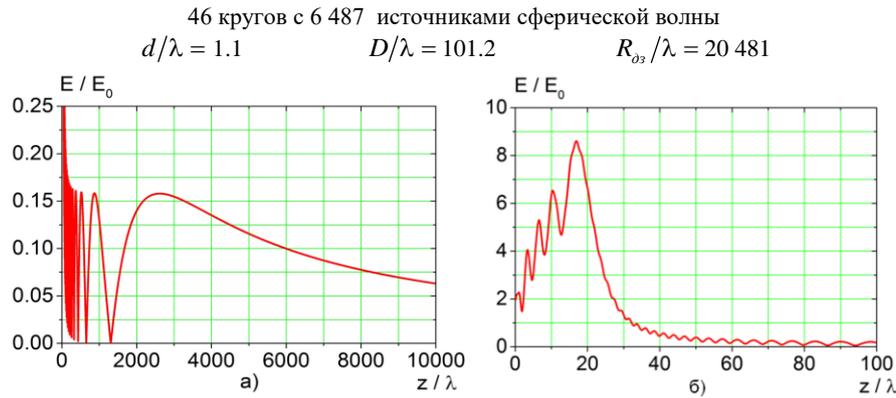


Рис. 6. Зависимость амплитуды поля решетки ( $d = 1.1\lambda$ ) с круглым раскрытием с диаметром  $100\lambda$  от расстояния в направлении нормали к раскрытию: а) – до половины расстояния дальней зоны; б) – до расстояния, равного размеру раскрытия.

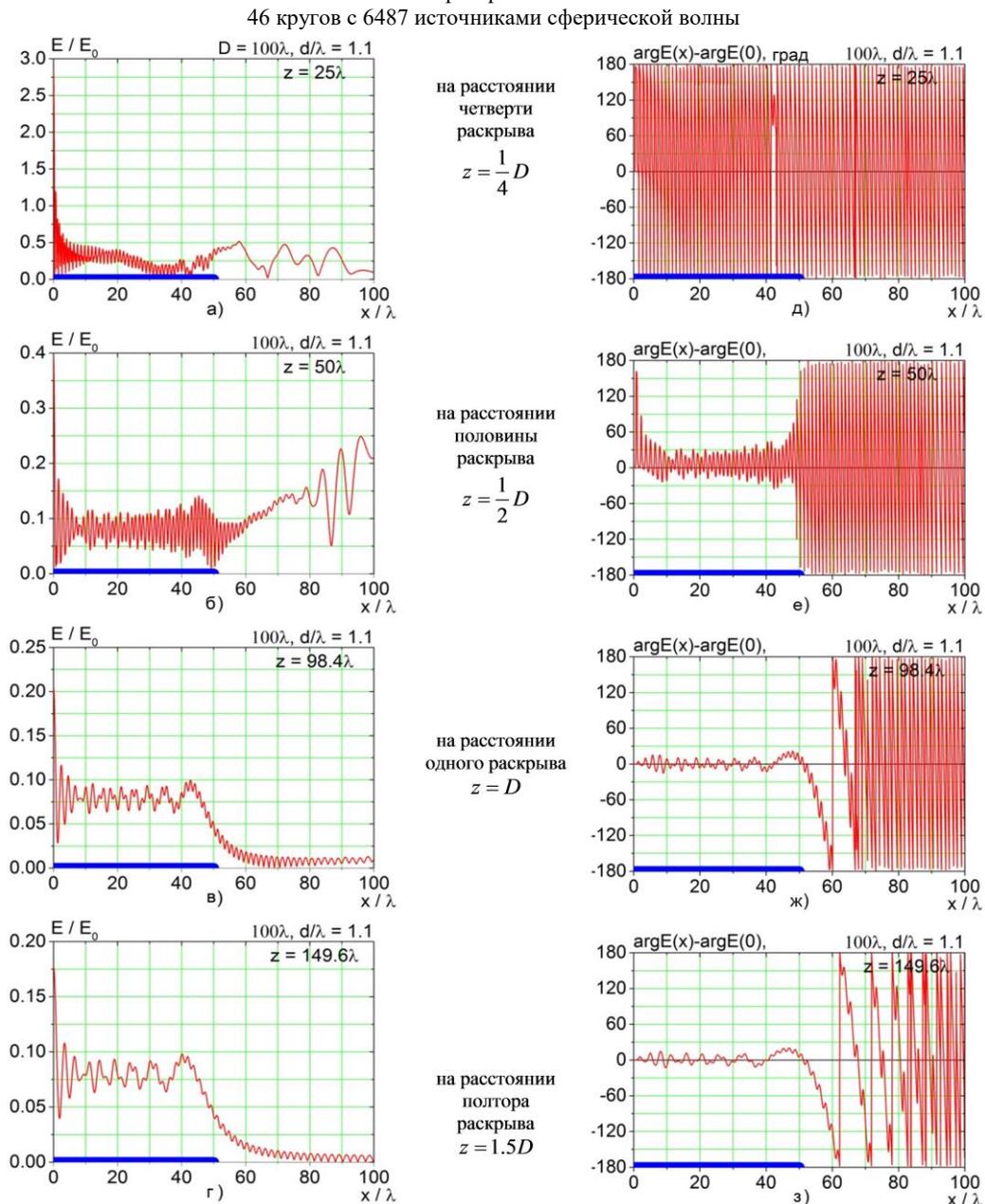


Рис. 7. Зависимость амплитуды и фазы поля решетки ( $d = 1.1\lambda$ ) с круглым раскрытием диаметром  $100\lambda$  от поперечной координаты  $x$  на разных расстояниях  $z$  от раскрытия антенны.

3. На расстоянии около половины раскрыва разреженной антенной решетки зависимость амплитуды поля от продольной координаты приняла регулярный характер (Рис. 6б), однако в поперечном сечении пространства наблюдения на этом расстоянии появилась аномалия – увеличение амплитуды поля вне кругового цилиндра с диаметром, равным диаметру раскрываемого кольцевой антенной решетки (Рис. 7б). Очевидно, что это явление связано с появлением дифракционных лепестков в диаграмме направленности исследуемой антенны. Фазовое распределение поля в этом сечении, как видно из Рис. 7е, осциллирующее в ограниченных пределах и в среднем близко к постоянному в пределах цилиндра, и переменноразное вне цилиндра.

4. На расстояниях, примерно равных и больших диаметра раскрыва разреженной антенной решетки пространственное распределение амплитуды и фазы поля в ближней зоне приобретает характер прожекторного луча. Отметим, что эти явления в ближней зоне разреженных многокольцевых антенных решеток – появление «следа» интерференционных лепестков диаграммы направленности в ближней зоне на расстоянии около половины длины антенны и формирование близкого к плоскому фронта волны в сечении, в котором расположена антенна, на расстояниях, равных или больших длины антенны, имеет место и в случае ближней зоны линейных разреженных антенных решеток больших электрических размеров (см. Рис. 1в и 4б, в, е, ж) в [3].

При увеличении расстояния между излучателями нарушается равномерный характер осцилляций амплитуды поля в ближней зоне антенны. В частности, в разреженных антенных решетках при  $d=1,1\lambda$ , по мере удаления точки наблюдения от раскрыва амплитуда поля увеличивается, а потом довольно быстро уменьшается. Также в этом случае, имеет место увеличение амплитуды и мощности поля в областях пространства вне прожекторного луча, чего не наблюдается в случаях непрерывных антенн с раскрывом круглой формы и в апертурных кольцевых антенных решетках с меньшими расстояниями между излучателями.

## ВЫВОДЫ

1. Разработано математическое обеспечение решения внешней векторной задачи электродинамики об излучении эквидистантных однородных синфазных плоских многокольцевых антенных решеток с раскрывом круглой формы в ближней и промежуточной зонах наблюдения. Проведенные детальные расчеты амплитудных и фазовых характеристик электромагнитных полей как в направлении нормали к раскрыву, так и в зависимости от поперечных координат при изменении диаметра раскрыва от 0,5 до 200 длин волн и расстояний между излучателями от 0,25 до 2 длин волн, позволили изучить фундаментальные эффекты при формировании пространственного распределения электромагнитных полей в ближней зоне антенных решеток.

2. Из анализа результатов расчетов показано, что если размеры апертуры подобных антенн не превышают одной - полутора длин волн амплитуда поля в направлении нормали к раскрыву равномерно и довольно быстро уменьшается и прожекторные лучи не формируются, как и в случае линейных антенн. Расстояние дальней зоны таких антенн равно приблизительно двум длинам волн.

3. В случае апертурных антенных решеток с раскрывом круглой формы диаметром полторы – две и больше длин волн в ближней зоне формируется прожекторный луч, представляющий собой локально ограниченную слабонеоднородную плоскую волну, в которой в процессе распространения сохраняется неизменной средняя амплитуда поля. В отличие от непрерывных апертурных антенн с раскрывом круглой формы, в которых в прожекторном луче средняя амплитуда поля равна ее значению в центре раскрыва, в многокольцевых эквидистантных антенных решетках средняя амплитуда поля в ближней зоне зависит от числа излучателей, расстояния между ними и электрических размеров раскрыва.

4. Показано, что перепады амплитуды поля в прожекторном луче в направлении нормали к раскрыву, то есть продольные градиенты амплитуды поля, в случае многокольцевых антенных решеток значительно большие, чем в случае линейных, квазилинейных, прямоугольных и квадратных апертур. При увеличении диаметров круглых апертур значительно уменьшаются минимальные значения амплитуд полей в ближней зоне, т.е. образуются "мертвые зоны" в радиолокационных, телекоммуникационных и технологических радиоэлектронных системах, работающих в ближней зоне антенных устройств.

5. Увеличение расстояния между излучателями приводит к нарушению равномерного характера осцилляций амплитуды и мощности электромагнитного поля в ближней зоне однородных апертурных антенных решеток осесимметричной формы. Обнаружено явление увеличения амплитуды поля вне прожекторного луча в ближней зоне разреженных кольцевых антенных решеток

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

**Authors' ORCID ID**

**N.N. Gorobets**  <https://orcid.org/0000-0003-3022-9044>

**A.S. Lebedev**  <https://orcid.org/0000-0002-7278-1447>

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Волновые процессы в ближней зоне слабонаправленных апертурных излучателей электромагнитных волн. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». 2015. Вып. 183. С. 105–115.
2. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Волновые процессы в ближней зоне апертурных антенн с раскрывом круглой формы. Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”. 2017. Вип. 26. С. 24-34
3. Горобец Н.Н., Лебедев А.С. Электромагнитные поля в ближней зоне линейных антенных решеток. Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна, Сер. Радіофізика та електроніка. 2016, Вип. 25. С.3-11.
4. Булгакова А.А., Горобец Н.Н., Катрич В. А., Лященко В. А. Коэффициент направленного действия антенных решеток. Радиофизика и радиоастрономия. 2016, Т. 21, № 4. С. 285–297.
5. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию). М.: Антенны. 2002. № 2-3. 232 с.
6. Hu M.K. Fresnel Region Field Distribution of Circular Aperture Antennas // IRE Trans. Antennas and Propagation. 1960. V. 8. P. 344-346.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-06>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

## СКР-ЛІДАР ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРИЗЕМНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ

**В.П.Титар, О.В.Шпаченко**

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4*

E-mail: [inhol@ukr.net](mailto:inhol@ukr.net)

Надійшла до редакції 7 лютого 2019 р.

**Актуальність.** Розробка та впровадження у практику новітніх методів екологічного моніторингу атмосфери є в наш час актуальною задачею у зв'язку з постійно зростаючим техногенним забрудненням біосфери Землі. Особливо актуальним є дистанційний контроль газового складу приземного шару атмосфери в умовах промислової зони сучасного мегаполісу для обґрунтованого введення штрафних санкцій по відношенню до підприємств, чий викиди забруднюючих речовин перевищують встановлені норми.

**Мета роботи** – розробка екологічного СКР-лідара для контролю газового складу повітряного басейну великих мегаполісів та теоретична перевірка його ефективності для вирішення поставленої задачі.

**Матеріали та методи.** В основу розробленого лідара для екологічного моніторингу приземного шару атмосфери покладено метод спонтанного комбінаційного розсіяння (СКР), що обумовлено особливостями поставленої задачі. Метод СКР дозволяє проводити дистанційне визначення газового складу атмосфери на відстанях до декількох кілометрів з достатньо високим розрізненням (до 1 метра) та обчислювати абсолютну концентрацію забруднюючих газів, що виявляються в досліджуваній області повітряного простору, шляхом порівняння інтенсивності ліній-супутників забруднювача та азоту в зареєстрованому спектрі СКР.

**Результати.** Обґрунтовано вибір методу СКР для дистанційного лазерного контролю за станом приземного шару атмосфери в умовах великих промислових центрів. Представлено принципову блок-схему та основні технічні характеристики розробленого СКР-лідара. Проведено попередні розрахунки ефективності використання розробленого лідара для екологічного моніторингу повітряного басейну великих мегаполісів.

**Висновки.** Проведені розрахунки показали, що технічні характеристики розробленого СКР-лідара дозволяють проводити виявлення таких забруднюючих газів, як CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> на відстанях до 200 м при їх концентраціях на рівні гранично допустимих значень у робочій зоні підприємства при роботі приймального каналу лідара в режимі накопичення сигналу протягом часу від 10 секунд до 4 хвилин. Такі характеристики дозволяють використовувати цей пристрій для оперативного дистанційного екологічного контролю за станом повітря в міській межі та поблизу промислових підприємств.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** лідар, спонтанне комбінаційне розсіяння, приземний шар атмосфери, екологічний контроль.

## СКР-ЛИДАР ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

**В.П.Титарь, О.В. Шпаченко**

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4*

**Актуальность.** Разработка и внедрение в практику новейших методов экологического мониторинга атмосферы является в настоящее время актуальной задачей в связи с постоянно возрастающим техногенным загрязнением биосферы Земли. Особенно актуальным является дистанционный контроль газового состава приземного слоя атмосферы в условиях промышленной зоны современного мегаполиса для обоснованного введения штрафных санкций в отношении предприятий, чьи выбросы загрязняющих веществ превышают установленные нормы.

**Цель работы** – разработка экологического СКР-лидара для контроля газового состава воздушного бассейна крупных мегаполисов и теоретическая проверка его эффективности для решения поставленной задачи.

**Матеріали і методи.** В основу розробаного лідара для екологічного моніторингу приземного шара атмосфери положен метод спонтанного комбінаційного розсіяння (СКР), що обумовлено особливостями поставленої задачі. Метод СКР дозволяє проводити дистанційне визначення газового складу атмосфери на відстанях до декількох кілометрів з достатньо високим розрешенням (до 1 метра) і вичисляти абсолютну концентрацію виявляємих забруднюючих газів в досліджуваній області повітряного простору шляхом порівняння інтенсивності ліній-спутників забруднювача і азота в зареєстрованому спектрі СКР.

**Результати.** Обоснован вибір методу СКР для дистанційного лазерного контролю за станом приземного шара атмосфери в умовах великих промислових центрів. Представлена принципова блок-схема і основні технічні характеристики розробаного СКР-лідара. Проведені попередні розрахунки ефективності використання розробаного лідара для екологічного моніторингу повітряного басейну великих мегаполісів.

**Висновки.** Проведені розрахунки показали, що технічні характеристики розробаного СКР-лідара дозволять здійснювати виявлення таких забруднюючих газів, як CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> на відстанях до 200 м при їх концентраціях на рівні гранично допустимих значень в робочій зоні підприємства при роботі прийомного каналу лідара в режимі накоплення сигналу в часі від 10 с до 4 мин. Такі характеристики дозволять використовувати дане пристрій для оперативного дистанційного екологічного контролю за станом повітря в міській зоні і поблизу промислових підприємств.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** лідар, спонтанне комбінаційне розсіяння, приземний шар атмосфери, екологічний контроль.

## SRS-LIDAR FOR ENVIRONMENTAL MONITORING ATMOSPHERIC SURFACE LAYERS

V.P. Titar, O.V. Shpachenko

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

**Background:** The development and implementation of new methods of environmental monitoring is an urgent problem due to the technogenic pollution of the Earth's biosphere. The remote control of the gas composition of the surface atmosphere layer in industrial zones of modern metropolis is important for determining penalties for enterprises whose emissions exceed established norms.

**Objectives:** Development of an ecological Spontaneous Raman Scattering (SRS) lidar for monitoring the gas composition in the air basin of large megacities. Theoretical verification of the lidar effectiveness for problem solving.

**Materials and methods:** The developed lidar for environmental monitoring of the atmospheric surface layer is based on the SRS method which allows remote monitoring of the atmospheric gas composition at distances up to several kilometers with a fairly high resolution (up to 1 meter). The absolute concentration of detected polluting gases is determined by comparing the intensities of the satellite pollutant and nitrogen lines in the recorded SRS spectra.

**Results:** The choice of the SRS method for remote laser monitoring of the atmosphere ground layer in large industrial centers is substantiated. The block diagram and the main technical characteristics of the developed SRS lidar are presented. Preliminary estimates of the lidar efficiency for the environmental monitoring were carried out.

**Conclusions:** The simulation results have shown that the specifications of the SRS lidar allow detecting of following polluting gases: CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> at distances up to 200 m with the maximum permissible concentration level. The simulation results were obtained when accumulation time varied from 10 s to 4 min. The specification of the SRS lidar allow its using for remote monitoring of air conditions in the cities and near industrial enterprises.

**KEYWORDS:** lidar, spontaneous Raman scattering; atmosphere ground layer; environmental monitoring.

## ВСТУП

Через постійне зростання техногенного забруднення біосфери Землі велику актуальність набуває розробка і впровадження в практику новітніх методів екологічного моніторингу.

Важливим напрямком екологічного моніторингу є одержання даних щодо стану приземного шару атмосфери у великих промислових центрах та сучасних мегаполісах. У цьому випадку велику роль відіграє оперативність одержання даних про джерела забруднення атмосфери: локалізація джерела, повний список забруднюючих речовин та їх кількість в досліджуваному об'ємі повітря. Такі задачі з

успіхом може вирішити мобільний голографічний газоаерозольний лідарний комплекс, який розробляється в лабораторії радіо- та оптичної голографії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна [1-4]. Дана робота присвячена питанням створення газоаналізуючого каналу голографічного газоаерозольного лідарного комплексу, який також може бути з успіхом використаний в якості самостійного мобільного лідара для визначення газового стану приземного шару атмосфери [5].

### ВИБІР МЕТОДУ ЛІДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ

Лідарні методи зондування належать до так званих активних методів контролю забруднення оточуючого середовища, оскільки вони спираються на взаємодію лазерного випромінювання з різними компонентами атмосферного повітря. При лазерному зондуванні в основному використовуються наступні ефекти взаємодії хвилі світла із середовищем: аерозольне та молекулярне розсіювання, спонтанне комбінаційне (раманівське) розсіювання, а також резонансне поглинання. Як правило, у створюваних для контролю атмосфери установках використовується будь-який один із перерахованих вище ефектів, вибір якого залежить від поставленої задачі.

Метод диференційного поглинання ґрунтується на поглинанні енергії світла молекулами досліджуваного газу при співпаданні частоти випромінювання лазера із частотою електронного або коливально-обертального переходу даних молекул. Для технічної реалізації цього методу необхідно здійснювати зондування на двох частотах, одна з яких точно співпадає з резонансною частотою досліджуваних молекул, а друга – дещо від неї відрізняється (зазвичай різниця довжин хвиль складає близько 15 нм), що необхідно для врахування впливу на результати вимірювання аерозольного і молекулярного розсіювання та поглинання сторонніми речовинами [6]. Метод виявляється ефективним у тому випадку, коли застосовується режим часового накопичення і визначається середня концентрація досліджуваного газу уздовж стаціонарної траси, на одному кінці якої розташований зондувальний лазер, а на іншому – приймальний пристрій. Якщо приймач і випромінювач розташовуються поруч, то на іншому кінці траси поміщується відбивач.

При зондуванні атмосфери на двох частотах, одна з яких ( $\nu_1$ ) лежить на лінії поглинання, а інша ( $\nu_2$ ) поза нею, середню концентрацію газу  $\bar{N}$  на трасі довжиною  $z$  можна визначити за формулою [7]:

$$\bar{N} = \frac{\ln K (J_{\nu_1} / J_{\nu_2})}{2(\sigma_{\nu_1} - \sigma_{\nu_2})z} \quad (1)$$

де  $K$  – апаратурна константа, обумовлена відмінностями в енергії лазерів, пропусканні фільтрів та ін. на частотах  $\nu_1$  і  $\nu_2$ ;  $J_{\nu_1}$  і  $J_{\nu_2}$  – інтенсивності прийнятого випромінювання на двох частотах, що використовуються, після проходження зондувального імпульсу через досліджуваний шар атмосфери;  $\sigma_{\nu_1}$  і  $\sigma_{\nu_2}$  – поперечні перерізи поглинання на частотах  $\nu_1$  і  $\nu_2$ .

Формулу (1) можна застосувати за умови, що частоти зондувальних імпульсів не дуже відрізняються, а, отже, вплив молекулярного і аерозольного розсіювання на цих частотах на трансформацію сигналів зворотного розсіювання практично однаковий.

У випадку використання методу диференційного поглинання для лідарних вимірювань роль розподіленого у просторі рефлектора відіграє атмосферний аерозоль. При цьому просторове розрізнення виявляється невисоким (від 200 до 500 м), а чутливість методу знижується. До недоліків даного методу слід віднести необхідність точного налаштування лазерів, що застосовуються, на певну частоту, причому лазери повинні мати хорошу спектральну чутливість. Для визначення концентрації декількох газів методом диференційного поглинання необхідно застосовувати зондування на декількох парах довжин хвиль, що потребує або застосування в одному лідарі цілого ряду стабільних лазерів, або мінімум двох лазерів з частотою, яку можна перестроювати. Для дослідження приземного шару атмосфери метод диференційного поглинання ефективний при визначенні середніх концентрацій газів уздовж стаціонарної траси, коли необхідно виявити наявність дуже малих концентрацій одного досліджуваного газу, але при цьому немає необхідності визначати локалізацію джерел забруднення.

В умовах мегаполіса, де є різні джерела забруднення (промислове виробництво, автомобільний транспорт тощо), виникає необхідність оперативного визначення цілого ряду забруднюючих речовин з точною локалізацією джерел забруднення. Для цієї мети більше підходить метод спонтанного комбінаційного (раманівського) розсіювання (СКР) [8], який і було обрано нами при створенні лідара для контролю газового стану приземного шару атмосфери.

На відміну від методу диференційного поглинання, метод СКР має дещо меншу чутливість і дальність (до 2 км), однак він дає змогу одержувати практично миттєвий розподіл забруднювачів уздовж траси з високим просторовим розрізненням (порядку одного метра) [9]. До переваг методу СКР слід

віднести і той факт, що тут відпадає необхідність зондування на двох частотах і немає потреби у лазері з певною або перестроюваною частотою випромінювання.

Визначення хімічного складу атмосфери методом СКР засноване на аналізі спектра розсіяного назад випромінювання, в якому окрім ліній, що характеризують падаюче світло, спостерігаються додаткові лінії-супутники. Відміна в частотах збуджуючої первинної лінії і ліній кожного із супутників є характеристикою речовини, що розсіює, і дорівнює частотам власних коливань його молекул. Тому, на відміну від методу диференційного поглинання, список газів, що визначаються методом СКР, конструктивно нічим не обмежений.

Метод СКР дає змогу визначати концентрацію досліджуваного газу, користуючись залежністю між числом фотоелектронів  $P(z, \lambda_R)$  в сигналі, який прийняла лідарна система на довжині хвилі СКР досліджуваного газу  $\lambda_R$ , і концентрацією цього газу  $N(z)$  на відстані  $z$  від лідара. Ця залежність визначається виразом [9]:

$$P(z, \lambda_R) = n_0 K S \eta \frac{\Delta z}{z^2} \sigma_R N(z) \exp \left\{ -2 \int_0^z [\sigma_A(\xi, \lambda_0) + \sigma_M(\xi, \lambda_0) + \sigma_A(\xi, \lambda_R) + \sigma_M(\xi, \lambda_R)] d\xi \right\} \quad (2)$$

де  $n_0$  – випромінене лідаром число фотонів;  $K$  – коефіцієнт пропускання оптики приймально-передаючої системи лідара;  $S$  – площа приймальної апертури лідара;  $\eta$  – квантова ефективність використаного в лідарі фотоприймача;  $\Delta z$  – інтервал спостереження (строб);  $\sigma_R$  – зворотний поперечний переріз СКР досліджуваної газової компоненти;  $\lambda_0$  – довжина хвилі зондуючого лазерного імпульсу;  $\sigma_A(\xi, \lambda_0)$ ,  $\sigma_M(\xi, \lambda_0)$ ,  $\sigma_A(\xi, \lambda_R)$ ,  $\sigma_M(\xi, \lambda_R)$  – коефіцієнти аерозольного ( $A$ ) і молекулярного (релеївського) ( $M$ ) розсіювання на довжинах хвиль  $\lambda_0$  і  $\lambda_R$ , відповідно.

Число фотонів  $n_0$  в лазерному зондуючому імпульсі визначається виразом:

$$n_0 = \frac{W \lambda_0}{hc}, \quad (3)$$

де  $h$  – постійна Планка;  $c$  – швидкість світла;  $W$  – енергія в лазерному імпульсі.

Коефіцієнт молекулярного розсіювання в залежності від довжини хвилі  $\lambda$  можна визначити із рівняння Релеївського розсіювання наступним чином [10]:

$$\sigma_M(h, \lambda) = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{3\lambda^4} \frac{\rho(H)}{N}, \quad (4)$$

де  $n = 1.00029$  – показник заломлення повітря;  $H$  – висота над рівнем моря атмосферної точки, в якій відбулося молекулярне розсіювання;  $N = 2.504 \cdot 10^{25}$  – кількість молекул в одному кубічному метрі стандартної атмосфери;  $\rho(H)$  – коефіцієнт щільності атмосфери.

Коефіцієнт щільності атмосфери можна апроксимувати експоненціальною функцією [10]:

$$\rho(H) = \exp \left( -\frac{H}{H_0} \right), \quad (5)$$

де  $H_0 = 7994$  м називається приведеною висотою.

Коефіцієнт аерозольного розсіювання  $\sigma_A$  у формулі (2) визначається виразом [11]:

$$\sigma_A(\xi, \lambda) = \pi a^2 Q_s(x), \quad (6)$$

де  $a$  – радіус аерозольної частинки;  $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$  – параметр, який використовується в теорії Мі і являє собою розмір аерозольної частинки в відносних одиницях;  $Q_s(x)$  – фактор ефективності розсіювання.

Функція  $Q_s(x)$  обчислюється за формулами Мі та відомими константами речовини, з якої складається аерозоль [11].

Поперечний переріз СКР ( $\sigma_R$ ) може бути одержаний теоретично в межах квантовомеханічної теорії взаємодії системи частинок з монохроматичним лінійно поляризованим світлом.

Використовуючи відоме рівняння Крамерса-Гейзенберга [12], диференційний переріз СКР  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ , віднесений до одиничного тілесного кута, до одиниці об'єму середовища і до однієї поляризації випромінювання, можна записати наступним чином [13, 14]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N(2\pi)^4 \nu_0 \nu_R^3}{h^2 c^4} \left| \sum_i \left\{ \frac{M_{gi} M_{if}}{\nu_0 - \nu_i} + \frac{M_{gi} M_{if}}{\nu_R - \nu_i} \right\} \right|^2, \quad (7)$$

де  $\nu_0$  – частота випромінювання зондуючого імпульсу;  $\nu_R$  – частота випромінювання СКР;  $\nu_j$  – частота проміжного стану;  $M_{gi}$  і  $M_{if}$  – матричні елементи оператора Гамільтона, які пов'язують основний (початковий) стан квантової системи ( $g$ ), що розглядається, з проміжним станом ( $i$ ) і кінцевим станом ( $f$ ).

Нажаль, точний розрахунок диференційного перерізу СКР за формулою (7) можливий лише для простих двоатомних молекул водню і дейтерію [15]. Тому зазвичай для розрахунків використовуються наведені нижче формули, одержані на основі теоретичного розгляду поляризованості молекул в полі випромінювання. В цьому випадку сумарний диференціальний переріз стоксівського та анти-стоксівського СКР-розсіювання у напрямку назад можуть бути описані формулами (8) і (9), відповідно [9]:

$$\left(\frac{d\sigma_j}{d\Omega}\right)_{Stokes} = \frac{A_j^2 (\nu_0 - \nu_j)^4 G}{c^4 [1 - \exp(-h\nu_j / k_B T)]} \left\{ \hat{\alpha}_j^2 + \frac{7}{45} \hat{\gamma}_j^2 \right\}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{d\sigma_j}{d\Omega}\right)_{anti-Stokes} = \frac{A_j^2 (\nu_0 + \nu_j)^4 G}{c^4 [\exp(h\nu_j / k_B T) - 1]} \left\{ \hat{\alpha}_j^2 + \frac{7}{45} \hat{\gamma}_j^2 \right\}, \quad (9)$$

$$A_j = \frac{h}{4\pi^2 \nu_j}, \quad (10)$$

$$G = \frac{\pi^2}{\epsilon_0^2}, \quad (11)$$

де  $A_j$  – амплітуда нульових коливань  $j$ -ї моди молекули;  $\nu_j$  – частота  $j$ -ї коливальної моди;  $k_B$  – постійна Больцмана;  $T$  – коливальна температура молекул;  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму;  $\hat{\alpha}_j^2, \hat{\gamma}_j^2$  – ізотропна і анізотропна частини тензора похідної поляризованості молекули за нормальною координатою  $q_i$ , де  $q_j = q_{j0} \cos(2\pi\nu_j t + \delta_j)$ .

Елементи матриць, що складають тензори  $\hat{\alpha}_j^2$  і  $\hat{\gamma}_j^2$ , визначаються за експериментальними даними.

Для визначення концентрації газових компонентів за формулою (2) необхідне точне знання усіх параметрів, що входять до неї. Однак, з урахуванням того факту, що багато коефіцієнтів у формулі (2) залежать від довжини хвилі і для різних газів будуть різними, використовувати даний вираз на практиці виявляється не завжди зручно. Важливою перевагою методу СКР є те, що абсолютну концентрацію газових компонентів можна визначити шляхом порівняння інтенсивності супутників досліджуваних забруднювачів з інтенсивністю супутника, зумовленого одним із основних атмосферних газів – азотом або киснем, концентрація яких в приземній області атмосфери є відомою і достатньо стабільною в часі. При цьому із рівняння (2) лазерної локації для СКР виключаються складні атмосферні й інструментальні параметри, і концентрація газу, яка визначається, ( $N_x(z)$ ) може бути вирахована за формулою:

$$N_x(z) = M \frac{P_x(z, \lambda_{Rx})}{P_{N_2}(z, \lambda_{RN_2})} \frac{\sigma_{RN_2}}{\sigma_{Rx}} N_{N_2}(z) \quad (12)$$

де  $M$  – апаратурна константа, яка обумовлюється відмінностями в коефіцієнтах пропускання оптики і чутливістю фотоприймача для довжин хвиль супутників  $\lambda_{Rx}$  і  $\lambda_{RN_2}$ ;  $P_x(z, \lambda_{Rx})$  і  $P_{N_2}(z, \lambda_{RN_2})$  – число зареєстрованих фотоелектронів при СКР на молекулах досліджуваного газу і молекулах атмосферного азоту, відповідно;  $\sigma_{Rx}$  і  $\sigma_{RN_2}$  – зворотні поперечні перерізи СКР досліджуваного газу і азоту;  $N_{N_2}(z)$  – концентрація азоту.

До переваг СКР-методу також слід віднести високе просторове розрізнення (порядку одного метра) і достатньо високу чутливість без використання режиму часового накопичення сигналу.

## ТЕХНІЧНИЙ ОПИС СКР-ЛІДАРА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ

Принципова блок-схема СКР лідара для контролю газового складу приземного шару атмосфери подана на Рис. 1.

Оскільки поперечні перетини комбінаційного розсіювання пропорційні четвертому ступеню частоти збуджуючого випромінювання [9], то в СКР-методі для збільшення дальності зондування краще використовувати ультрафіолетове випромінювання. Крім того, застосування довжин хвиль менше 270,0 нм відкриває можливість для цілодобових спостережень, оскільки дає змогу не враховувати фонову світлимість неба в денні години. В цьому випадку стоксові і антистоксові лінії-супутники газів, які визначаються, попадають в «сонячно-сліпу» область спектра, яка знаходиться в діапазоні від 200 нм до 300 нм.

З метою забезпечення більшої дальності зондування за рахунок збільшення зворотного поперечного перерізу СКР при зменшенні довжини хвилі зондуючого випромінювання, а також для можливості роботи в «сонячно-сліпому» діапазоні, нами був обраний неодимовий лазер з двократним подвоєнням частоти. Для цього в розробленій нами лідарній системі (Рис. 1) випромінювання імпульсного неодимового лазера 2 з довжиною хвилі  $\lambda_0 = 1060$  нм подається на подвоювачі частоти 3 і 4, після проходження яких довжина хвилі стає відповідно  $\lambda_1 = 530$  нм і  $\lambda_2 = 265$  нм. В лазері використовується діодна накачка. Блок живлення лазера позначений на схемі цифрою 1.

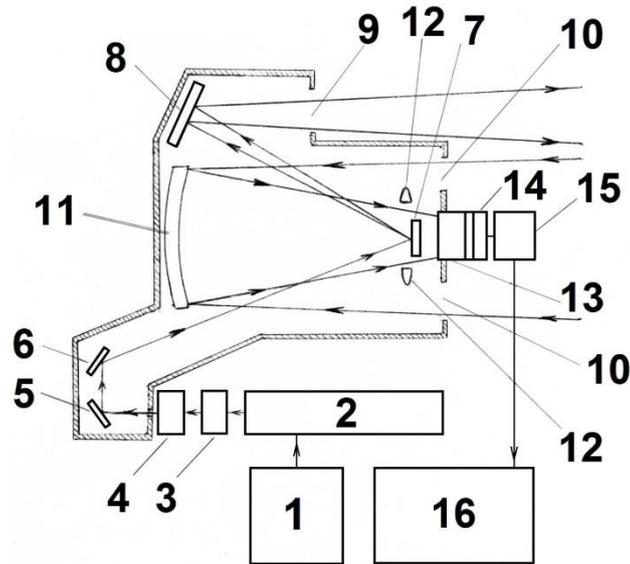


Рис. 1. Принципова блок-схема СКР лідара для контролю газового складу приземного шару атмосфери.

Енергія імпульсу основної гармоніки неодимового лазера складає 500 мДж, тривалість 6 нс, частота слідування імпульсів – 100 гц. Енергія імпульсу на довжині хвилі  $\lambda_2 = 265$  нм складає 100 мДж.

Після проходження подвоювачів частоти 3 і 4 лазерний імпульс з довжиною хвилі  $\lambda_2 = 265$  нм за допомогою поворотних дзеркал 5, 6 подається на скануюче дзеркало телескопа 7. Телескоп приймально-передаючої системи лідара побудований за схемою Кассегрена. Діаметр приймальної апертури телескопа складає 500 мм.

Скануюче дзеркало телескопа 7 разом із допоміжним дзеркалом 8 забезпечує спрямування зондуючих лазерних імпульсів через вихідне вікно 9 в потрібну область досліджуваного повітряного простору. Сканування простору зондуючими імпульсами по вертикалі і горизонталі за допомогою дзеркал 7 і 8 у поєднанні з технікою стробування дає змогу після обробки одержаних результатів відновлювати тривимірні зображення розподілу концентрацій забруднюючих газів.

Розсіяне у зворотному напрямку випромінювання, яке у своєму спектрі містить лінії-супутники, через вхідне вікно 10 попадає на фокусує дзеркало телескопа 11 і за допомогою оптичного коректора 12 та оптичної системи узгодження 13 через інтерференційний світлофільтр 14 подається на спектроаналізатор 15. Сигнали із спектроаналізатора передаються на комп'ютер 16 для подальшої обробки і візуалізації. Інтерференційний світлофільтр 14 відсікає випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda_2 = 265$  нм зондуючого імпульсу, яке є достатньо інтенсивним і при цьому не несе ніякої корисної інформації щодо забруднюючих газів, що визначаються методом СКР.

Для аналізу спектрів в розробленому лідарі використовується спектрометр «Ocean-FX» фірми «Ocean Optics» із збільшеною ефективністю в УФ-діапазоні [16]. Цей прилад дозволяє записувати до 4500 сканів в секунду. Прилад оснащений змінною щільною апертурою і може працювати в режимі накопичення сигналу, що можна використовувати для підвищення чутливості вимірювань, що проводяться за допомогою лідара.

Оцінка ефективності розробленого СКР-лідара була проведена з використанням формули (2) для деяких найбільш розповсюджених забруднюючих атмосферу речовин ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ). Нижче наведено технічні параметри розробленої лідарної системи, які були взяті для розрахунків.

Середній коефіцієнт пропускання оптики приймально-передавальної системи лідара на довжинах хвиль від 250 нм до 290 нм був узятий рівним 50%.

Використаний спектрометр «Ocean-FX» оснащений КМОП-матрицею «Hamamatsu S11639» [17], яка володіє підвищеною квантовою ефективністю в УФ діапазоні (від 45% і вище в залежності від довжини

хвилі). Для розрахунку було взято значення  $\eta$  в діапазоні ві 250 нм до 290 нм, яке дорівнює 40%. Співвідношення сигнал/шум в спектрометрі, що використовується, при одиночному скануванні дорівнює 400:1.

Під час комп'ютерного моделювання роботи СКР-лідара можна знехтувати експоненціальною залежністю щільності атмосфери від висоти (5), оскільки пристрій, що розробляється, призначений для зондування приземного шару атмосфери на висотах близько кілометра, де щільність атмосфери  $\rho(H)$  можна вважати постійною і прийняти її за одиницю. Розрахунки проводилися для прозорої атмосфери, для якої розсіяння від фонового аерозолу приблизно дорівнює молекулярному розсіянню (див. [18]), що визначається формулою (4).

Було проведено розрахунки для низки типових забруднюючих газів. При цьому вміст в атмосфері CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> було взято на рівні гранично допустимих концентрацій (ГДК) в робочій зоні підприємств [19]. Використані для розрахунків концентрації та комбінаційні зсуви частоти для перерахованих забруднюючих газів наведені в Табл. 1. Масова концентрація азоту в приземному шарі стандартної атмосфери була взята рівною 75,51% [20].

Таблиця 1. Концентрації і комбінаційні зсуви частоти забруднюючих газів, що було використано для розрахунків

Газ	Комбінаційний зсув частоти (см <sup>-1</sup> ) [15]	Концентрація	
		(мг/м <sup>3</sup> )	(ppm)
CO	2145	20	17,2
NO <sub>2</sub>	1320	5	2,6
SO <sub>2</sub>	1151,1	10	3,8
CH <sub>4</sub>	2914	30	45,1
H <sub>2</sub> S	2611	10	7,1
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3072	15	6,2

Оціночні розрахунки ефективності роботи лідара проводилися за формулою (2) в припущенні, що траса зондування є однорідною. В цьому випадку коефіцієнти аерозольного та молекулярного розсіяння, що стоять під знаком інтеграла, є константами, так що інтегрування за просторовою координатою дає тільки відстань до точки зондування. На Рис. 2-4 наведені результати розрахунків для траси зондування від 50 м до 200 м.

Під час комп'ютерного моделювання роботи лідара в режимі накопичення сигналу нами було враховано, що значення  $n_0$ , яке входить до формули (2), визначається не тільки виразом (3), але й також пропорційно часу накопичення. Оскільки різні гази мають різні значення зворотного поперечного перерізу СКР ( $\sigma_r$ ) і, окрім того, розрахунки проводилися для концентрацій, різних для різних газів (див. Табл. 1), то для досягнення приблизно однакових результатів для різних газів потрібен різний час накопичення сигналу. Це добре видно з Рис. 2, де зліва від осі ординат поряд з хімічною формулою забруднюючих газів вказано час накопичення сигналу, для якого було розраховано наведені графіки.

З урахуванням того, що  $n_0$  пропорційно часу накопичення сигналу, нами також було проведено розрахунки залежності часу виявлення досліджуваних забруднюючих газів від відстані до точки зондування, які представлені на Рис. 3. Як видно із графіків на Рис. 3, потрібний час накопичення сигналу різко зростає з відстанню за законом, близьким до квадратичного. Розрахунки показали, що для виявлення досліджуваних нами забруднюючих газів при їх концентрації, що дорівнює ГДК в робочій зоні підприємства, на відстані у півкілометра потрібно проводити режим накопичення сигналу протягом десятків хвилин (наприклад, 10 хвилин для CH<sub>4</sub>, 36 хвилин для C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), що, безумовно, знижує оперативність у роботі розробленої лідарної системи і робить проблематичним побудову тривимірного просторового розподілу газу, що виявляється, оскільки при наявності вітру за десятки хвилин відбудеться перемішування повітряних мас. Однак, як видно з графіків на Рис. 3, при дальності виявлення у 200 м режим накопичення становить для досліджуваних газів від 11 секунд (для CH<sub>4</sub>) до 4 хвилин (для CO), що є цілком прийнятним з точки зору оперативності вимірів, які проводяться лідаром.

Нами також було проведено розрахунки відношення кількості фотоелектронів, зареєстрованих лідарною системою на лінії СКР досліджуваного газу, до кількості фотоелектронів, зареєстрованих на лінії СКР азоту. Як було вже сказано вище, таке відношення ( $P_x / P_{N_2}$ ) входить до формули (12) і

використовується під час практичних натурних вимірювань концентрації забруднюючих газів методом СКР. Результати комп'ютерного моделювання залежностей  $(P_x / P_{N_2})$  від відстані до точки зондування для різних забруднюючих газів представлено на Рис. 4, де, як і на Рис. 2, зліва від осі абсцис поруч з формулою газу позначено час накопичення сигналу, для якого було проведено розрахунки.

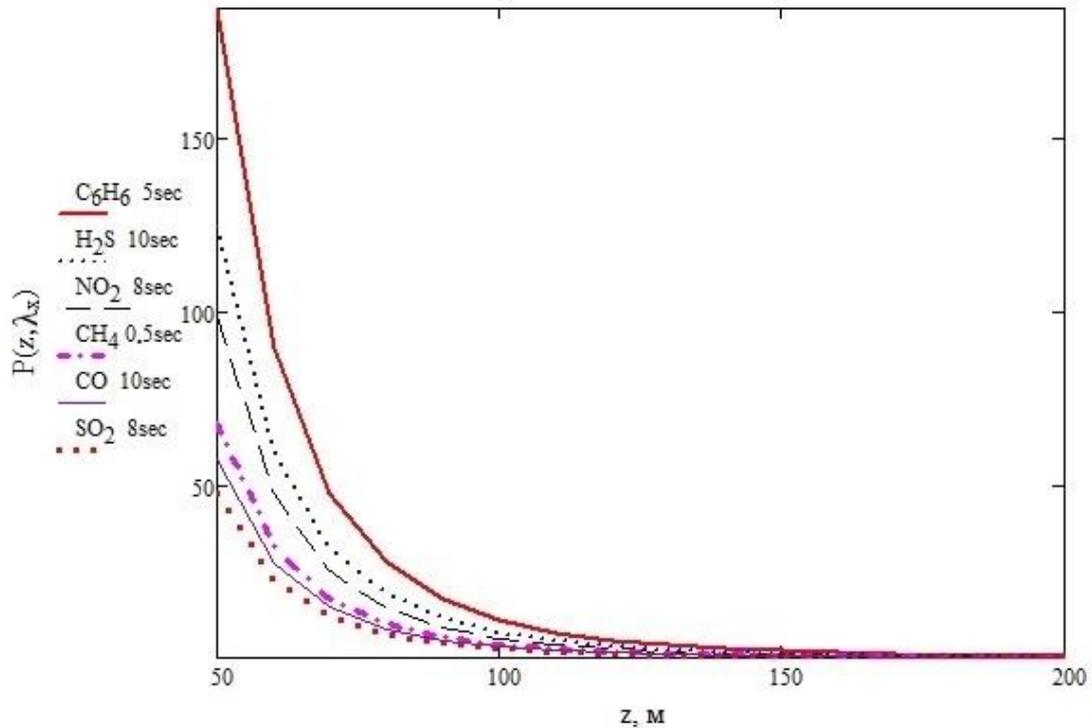


Рис. 2. Кількість зареєстрованих лідарною системою фотоелектронів  $P_x(z, \lambda_{Ri})$  в залежності від відстані до точки зондування ( $z$ ) для різних досліджуваних газів.

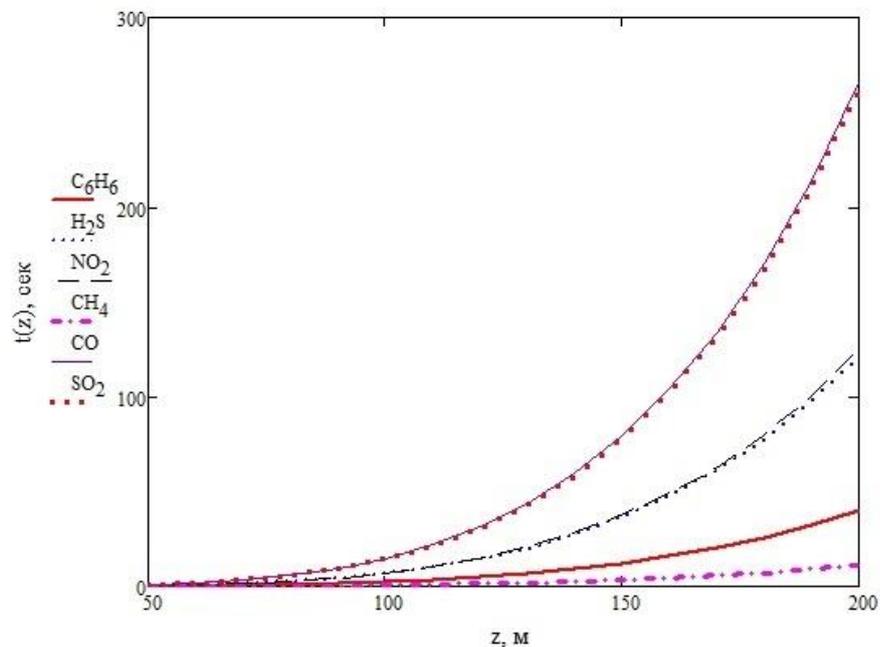


Рис. 3. Залежність часу виявлення досліджуваних забруднюючих газів від відстані до точки зондування.

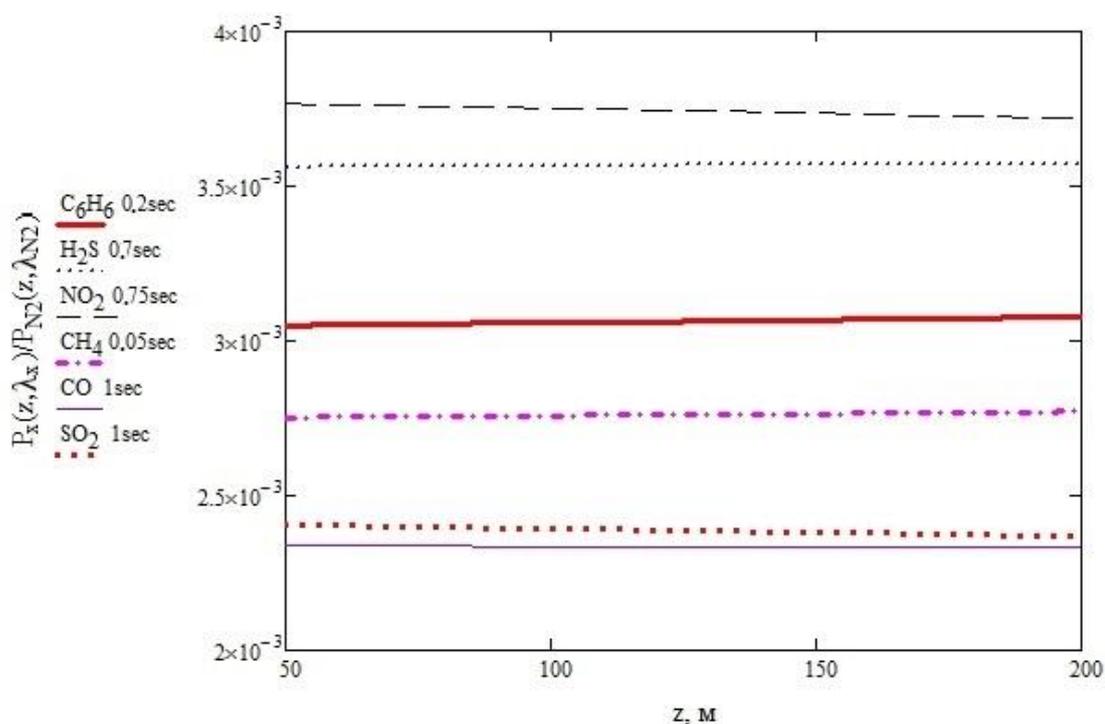


Рис. 4. Залежність від відстані до точки зондування ( $z$ ) відношення сигналу, зареєстрованого на лінії СКР досліджуваного газу, до сигналу, зареєстрованого на лінії СКР атмосферного азоту.

Оскільки азот є основною газовою компонентою атмосфери, інтенсивність сигналу, що прийнятий на лінії СКР азоту, на багато порядків перевищує інтенсивність сигналу, що прийнятий лідарною системою на лінії СКР будь-якого забруднюючого газу. Наприклад, при відстані до точки зондування у 50 метрів і режимі накопичення протягом 1 секунди кількість фотоелектронів для лінії азоту, розрахована за формулою (2), дорівнює  $2,455 \cdot 10^5$ , в той час, як для CO з тою ж самою тривалістю накопичення сигналу та з тою ж відстанню кількість зареєстрованих фотоелектронів становить всього 6 штук. Тому представляє інтерес порівняти відношення слабого сигналу ( $P_x$ ) до інтенсивного сигналу ( $P_{N_2}$ ) з чутливістю розробленої лідарної системи.

Якщо припустити, що чутливість лідарної системи обмежується внутрішніми шумами спектрометра, що використовується, то порогова чутливість буде відповідати величині, що є зворотною значенню відношення сигнал/шум, і у нашому випадку буде дорівнювати  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Як видно з графіків, представлених на Рис. 4, величина відношення ( $P_x / P_{N_2}$ ) перевищує порогову чутливість в усьому діапазоні розглянутих відстаней до точки зондування при роботі в режимі накопичення сигналу від 0,05 с (для CH<sub>4</sub>) до 1 с (для CO і SO<sub>2</sub>). При цьому для частини забруднюючих газів, таких як CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, графіки ( $P_x / P_{N_2}$ ) слабо спадають, в той час як для CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S та C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> прийнятий сигнал, нормований на лінію СКР азоту, дещо зростає з відстанню. Це пов'язано з тим, що коефіцієнт молекулярного (релеївського) розсіяння ( $\sigma_M$ ), який входить під знак експоненти, для CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> виявляється більшим, ніж відповідний коефіцієнт молекулярного розсіяння для азоту, а для CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S і C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>  $\sigma_M$  менше, ніж для N<sub>2</sub>. Задля наочності в Табл. 2 наведені значення коефіцієнтів молекулярного розсіяння для розглянутих газів, розраховані за формулою (4).

Таблиця 2. Розраховані коефіцієнти молекулярного розсіяння  $\sigma_M$  для довжини хвилі зондуючого випромінювання  $\lambda = 265$  нм

Газ	N <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
$\sigma_M, \text{ м}^{-1}$	$1,746 \cdot 10^{-4}$	$1,783 \cdot 10^{-4}$	$1,954 \cdot 10^{-4}$	$1,990 \cdot 10^{-4}$	$1,634 \cdot 10^{-4}$	$1,691 \cdot 10^{-4}$	$1,604 \cdot 10^{-4}$

## ВИСНОВКИ

Розроблений СКР-лідар має хороші технічні характеристики, які дозволяють проводити виявлення забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери на рівні одиниць ppm при дальності виявлення до 200 м як в нічний, так і в денний час з розрізненням по дальності 1 м при роботі в режимі накопичення сигналу від 10 с до 4 хв. Такі параметри дозволять використовувати даний пристрій для оперативного дистанційного екологічного контролю за станом повітря в міській межі і поблизу промислових підприємств. Добре просторове розрізнення забезпечить виявлення джерел забруднення атмосфери з великою точністю, що, зокрема, є необхідною умовою при визначенні штрафних санкцій по відношенню до підприємств, які порушують екологічні норми.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

## Authors' ORCID ID

Титарь В.П. <https://orcid.org/0000-0002-4874-8929>

Шпаченко О.В. <https://orcid.org/0000-0002-6072-5340>

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Титарь В.П., Шпаченко О.В. Голографический лидар для экологического мониторинга атмосферы // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2001. Вип. 1. № 513. – С 151-160.
2. Титарь В.П., Шпаченко О.В. Поляризаационные голографические методы лидарного контроля за состоянием атмосферы // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 1(5). – С. 111-117.
3. V. P. Titar, O. V. Shpachenko, V. I. Yartsev, "Mobile holographic lidar", International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM), June 29 – July, Kharkiv, Ukraine, 2006, pp. 187–190.
4. Титарь В.П., Шпаченко О.В., Ярцев В.И. Мобильный голографический лидар // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов. Сб. науч. статей 15-й Междунар. науч.-практ. конф., г.Щелкино, АР Крым, 4-8 июня 2007 г. – Харьков, 2007. – С. 254-258.
5. Titar V.P., Shpachenko O.V. Raman lidar for monitoring gas composition of the atmosphere ground layer // Proceeding of 8-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2019), 6-8 September, 2019. – Sozopol, Bulgaria, 2019. – P. 480 - 483.
6. S. Ismail and E. V. Browell, "Differential absorption lidar", "Encyclopedia of Atmospheric Sciences", 2015. Edition 2, pp. 277–288.
7. G.G. Gimmestad, "Differential-absorption lidar for ozone and industrial emissions" in "Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere", Springer, 2005, pp. 187–212.
8. J. Ruzankina, V. Elizarov, L. Konopel'ko, A. Zhevlakov, A.Grishkanich, "Raman lidar with for geoeological monitoring", Journal of Physics: Conference Series, vol. 1124, pp. 051036, 2018.
9. U. Wandinger, "Raman lidar" in "Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere", Springer, 2005, pp. 241–271.
10. T. Nishita, T. Sirai, K. Tadamura, E. Nakamae, "Display of the earth taking into account atmospheric scattering" Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93), 02 – 06 Aug., Anaheim, USA, 1993, pp. 175-182.
11. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
12. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 491 с.
13. Бломберген Н. Нелинейная оптика. – М.: Мир, 1966. – 424 с.
14. W.K. Bischel and G. Black, "Wavelength dependence of Raman scattering cross sections from 200-600 nm", in "Eximer Lasers-1983", AIP Conference Proceedings, vol. 100, pp. 181 – 187, 1983.
15. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
16. Ocean FX Miniature Spectrometer User Manual. [https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/Ocean-FX\\_Users\\_Guide\\_Ver\\_01.5.pdf](https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/Ocean-FX_Users_Guide_Ver_01.5.pdf)
17. Hamamatsu Image Sensors. Selection guide. – June 2019. [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/image\\_sensor\\_kmpd0002e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/image_sensor_kmpd0002e.pdf)
18. Разенков И.А. Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. – С. 52 – 63.
19. Гранично допустимі концентрації (ГДК) хімічних чинників у повітрі робочої зони, затверджені ГДСЛ від 17.07.2015. <http://normativ.ua/sanpin/tdoc27838.php>
20. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 506 с.

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-07>

УДК 537.874

## ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ ИНВЕРТИРОВАННОГО ПОЛОСКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТЬЮ

Д.В.Майборода, С.А.Погарский

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: spogarsky@gmail.com

Поступила в редакцию 15 февраля 2019 г.

**Актуальность.** В настоящее время в миллиметровом диапазоне длин волн весьма перспективно применение диэлектрических волноводов различных типов, в том числе металло-диэлектрических структур и функциональных узлов на их основе. Это обусловлено простотой и незначительной стоимостью изготовления диэлектрических волноводов и функциональных узлов на их основе, возможностью их интеграции с активными элементами, применением различных диэлектриков и полимеров, обладающих как широким диапазоном диэлектрических проницаемостей, так и разнообразием механических свойств (в частности, некоторые диэлектрические материалы обладают значительной гибкостью).

**Цель работы.** Оптимизировать способ возбуждения одной из собственных волн в обращенном полосковом диэлектрическом волноводе с металлической плоскостью посредством серии физических экспериментов.

**Материалы и методы.** Исследуемая электродинамическая структура относится к классу гибридных металло-диэлектрических структур. Ее основу составляет обращенный полосковый диэлектрический волновод с металлической плоскостью. Особенностью использованного обращенного полоскового диэлектрического волновода является его композиционный состав: основная часть волноведущего стержня, прилегающего к металлической плоскости, выполнена из полистирола, вторая часть выполнена из фторопласта. Оценка эффективности возбуждения проводилась по величине вносимого затухания в тракт. Методом подвижного зонда оценена степень концентрации электромагнитного поля вблизи сложнокомпозиционного волноведущего стержня. Визуализация полей осуществлялась с помощью метода изолиний.

**Результаты.** На основании серии экспериментальных исследований оптимизирован способ возбуждения инвертированного полоскового диэлектрического волновода с металлической плоскостью. Эффект оптимального возбуждения достигался за счет использования композиционной конструкции диэлектрического волноведущего стержня. При оптимальном соотношении материальных констант слоев, образующих волноведущий стержень, и геометрических параметров этих слоев удалось существенно расширить рабочую полосу частот, в пределах которой уровень вносимых потерь не превышал заданных значений. При этом установлено, что электромагнитное поле концентрируется преимущественно вблизи диэлектрического стержня, обеспечивая устойчивый волновой режим. Установлено, что при определенном соотношении параметров структуры в ней может реализовываться режим частотной селекции.

**Выводы.** В ходе измерений установлено, что обращенный полосковый диэлектрический волновод с металлической плоскостью при оптимальном выборе параметров способен эффективно поддерживать волновой режим с малым уровнем вносимых потерь. В целом структура при определенном выборе параметров может работать в двух режимах: волноведущем и режиме частотной селекции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инвертированный полосковый диэлектрический волновод, затухание, метод подвижного зонда, частотная селекция

## ОПТИМІЗАЦІЯ СПОСОБУ ЗБУДЖЕННЯ ІНВЕРТОВАНОГО СМУЖКОВОГО ХВИЛЕВОДУ З МЕТАЛЕВОЮ ПЛОЩИНЮ

Д.В. Майборода, С.О. Погарський

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

**Актуальність.** На теперішній час у міліметровому діапазоні довжин хвиль перспективним є застосування діелектричних хвилеводів різних типів, у тому числі металево-діелектричних структур і функціональних вузлів на їхній основі. Це обумовлено простотою та незначною вартістю виготовлення діелектричних хвилеводів і функціональних вузлів на їхній основі, можливістю їх інтеграції з активними елементами, застосуванням різних діелектриків та полімерів, що мають як широкий діапазон діелектричних проникностей, так і різноманітність механічних властивостей (зокрема, деякі діелектричні матеріали мають значну гнучкість).

**Мета роботи.** Оптимізувати спосіб збудження однієї із власних хвиль у інвертованому смужковому діелектричному хвилеводі з металевою площиною за допомогою серії фізичних експериментів.

**Матеріали та методи.** Досліджувана електродинамічна структура відноситься до класу гібридних металеводіелектричних структур. Її основу становить обернений смужковий діелектричний хвилевід з металевою площиною. Особливістю використаного оберненого смужкового діелектричного хвилеводу є його композиційна структура: основна частина хвилеведучого стрижня, що прилягає до металевої площини виконана з полістиролу, друга частина виконана із фторопласту. Оцінка ефективності збудження проводилася по величині внесеного загасання в тракт. Методом рухливого зонда був оцінений ступінь концентрації електромагнітного поля поблизу складнокомпозиційного хвилеведучого стрижня. Візуалізація полів здійснювалася за допомогою методу ізоліній.

**Результати.** На підставі серії експериментальних досліджень оптимізований спосіб збудження інвертованого смужкового діелектричного хвилеводу з металевою площиною. Ефект оптимального збудження досягався за рахунок використання композиційної конструкції діелектричного хвилеведучого стрижня. При оптимальному співвідношенні матеріальних констант шарів, що утворюють хвилеведучий стрижень, і геометричних параметрів цих шарів вдалося суттєво розширити робочу смугу частот, у межах якої рівень внесених втрат не перевищував заданих значень. При цьому встановлено, що електромагнітне поле концентрується переважно поблизу діелектричного стрижня, забезпечуючи стійкий хвильовий режим. Установлено, що при певному співвідношенні параметрів структури в ній може реалізовуватися режим частотної селекції.

**Висновки.** У ході вимірювань встановлено, що інвертований смужковий діелектричний хвилевід з металевою площиною при оптимальному виборі параметрів здатний ефективно підтримувати хвильовий режим з малим рівнем внесених втрат. У цілому структура при певному виборі параметрів може працювати у двох режимах: хвилеведучому і режимі частотної селекції.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** інвертований смужковий діелектричний хвилевід, загасання, метод рухливого зонда, частотна селекція

## OPTIMIZATION OF THE METHOD FOR EXCITING AN INVERTED STRIP DIELECTRIC WAVEGUIDE WITH METAL PLANE

D.V. Mayboroda, S.A. Pogarsky

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

**Background.** Currently, the application of various types of dielectric waveguides in the millimeter wavelength range is very promising, including metal-dielectric structures and functional units based on them. This is due to the simplicity and low cost of manufacturing dielectric waveguides and functional units based on them, the possibility of their integration with active elements, the use of various dielectrics and polymers having both a wide range of dielectric constants and a variety of mechanical properties (in particular, some dielectric materials have significant flexibility).

**Objectives.** To optimize the method of excitation of one of its eigenwaves in a inverted strip dielectric waveguide with a metal plane through a series of physical experiments.

**Materials and methods.** The studied electrodynamic structure belongs to the class of hybrid metal-dielectric structures. Its basis is a inverted strip dielectric waveguide with a metal plane. A feature of the used inverted strip dielectric waveguide is its composition: the main part of the waveguide rod adjacent to the metal plane is made of polystyrene, the second part is made of fluoroplastic. The evaluation of the excitation efficiency was carried out by the magnitude of the introduced attenuation into the tract. Using the method of a moving probe, the degree of concentration of the electromagnetic field near a complex compositional waveguiding rod was estimated. The fields were visualized using the contour method.

**Results.** Based on a series of experimental studies, the method for exciting an inverted strip dielectric waveguide with a metal plane is optimized. The effect of optimal excitation was achieved through the use of the composite design of the dielectric waveguiding rod. With the optimal ratio of the material constants of the layers forming the waveguiding rod and the geometric parameters of these layers, it was possible to significantly expand the working frequency band, within which the level of insertion loss did not exceed the specified values. It was found that the electromagnetic field is concentrated mainly near the dielectric rod, providing a stable wave mode. It has been established that with a certain ratio of structure parameters, the frequency selection mode can be implemented in it.

**Conclusions.** In the course of physical measurements, it was found that a inverted strip dielectric waveguide with a metal plane with the optimal choice of parameters is able to effectively maintain the wave mode with a low level of insertion loss. In general, a structure with a certain choice of parameters can operate in two regimes: waveguiding mode and frequency selection mode.

**KEY WORDS:** inverted dielectric waveguide, attenuation, VSWR, moving probe method, radiation pattern.

## ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические волноводы (ДВ) различных модификаций [1-5] имеют явные преимущества в КВЧ диапазоне по сравнению со стандартными прямоугольными волноводами благодаря своим свойствам: простоте реализации с реальными допусками на изготовление, возможностью реализации формообразования сложноконструктивных узлов с помощью достаточно простых методов при серийном производстве и др.

При всем многообразии существующих конструктивных исполнений узлов на ДВ актуальным остается вопрос поиска новых модификаций ДВ, позволяющих решать специфические задачи создания функциональных элементов с улучшенными характеристиками [6, 7]. С этой точки зрения реальны конструкции линий передачи, которые по своим свойствам принципиально отличаются по вносимым потерям от известных и соответственно имеют выигрыш по параметрам при их применении в конкретных КВЧ приборах. В работе [8] рассмотрены связанные инвертированные диэлектрические волноводы с металлической плоскостью [ИДВМП], используемые в таких устройствах как фильтры, ответвители, передающие системы, параметры которых при использовании ИДВМП расширяют возможности их применения. Вместе с тем, любая модификация базовой линии передачи требует проведения ряда фундаментальных исследований, включающих в себя изучение возбуждаемого спектра собственных волн и соответствующих им структур полей, способов их возбуждения и ряд других.

В данном исследовании особый акцент сделан на вопросах возбуждения инвертированного полоскового волновода с металлической плоскостью, согласования с подводными трактами.

### БАЗОВАЯ СТРУКТУРА

В известных в настоящее время работах отсутствуют данные об использовании сложнокомпозиционных полосковых диэлектрических волноводов как составной части инвертированных полосковых диэлектрических волноводов (ИПДВ) в 8-мм диапазоне длин волн. Такого рода информация особенно актуальна при решении вопроса об эффективном возбуждении структуры с обеспечением минимума потерь. Кроме того, при использовании достаточно хорошо известного способа возбуждения путем введения в пространство металлических волноводов части сплошного диэлектрического стержня [9-11] не могут быть обеспечены стабильные результаты вследствие достаточно большой длины самого стержня (по отношению к длине волны) и трудностей обеспечения плотного контакта с остальными элементами тракта.

На Рис. 1 представлено схематическое изображение сложнокомпозиционной структуры. На рисунке использованы следующие обозначения: **1** – металлические волноводы, **2** – металлическое основание, **3** – полосковый диэлектрический волновод (диэлектрический стержень) с одним значением относительной диэлектрической проницаемости, **4** – полосковый диэлектрический волновод (диэлектрический стержень) с другим значением относительной диэлектрической проницаемости, **5** – диэлектрическая пластина (подложка). **6** – элементы диэлектрического стержня со скосами.

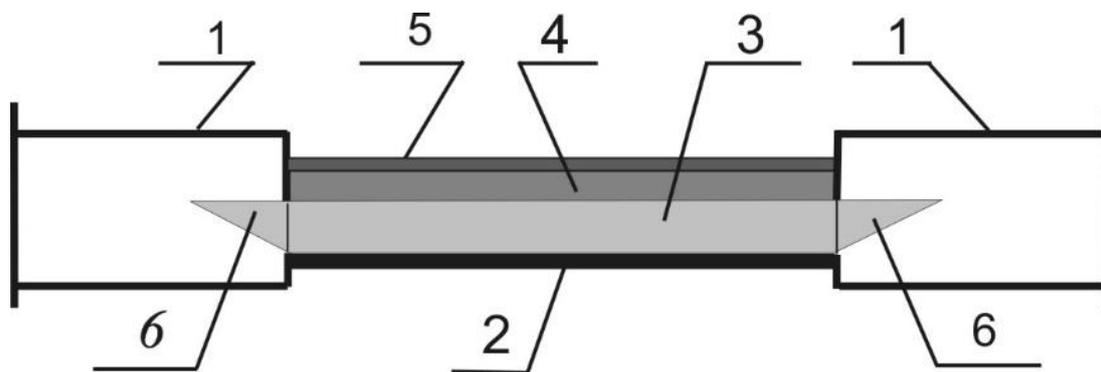


Рис. 1. Схематическое изображение структуры.

Существенной особенностью структуры по сравнению с известными ранее [11] является композиционный состав волноведущего диэлектрического стержня: основная волноведущая часть выполнена из одного вида диэлектрика (**3**), а вторая (**4**) – выполнена из другого вида диэлектрика. Такого рода композиционное выполнение волноведущей части ИПДВ позволяет решить одновременно две задачи. Первая – это управление перераспределением величин мощностей электромагнитного поля, сосредоточенных в различных областях сложнокомпозиционного стержня, а вторая – чисто конструктивная: выполняя часть стержня, прилегающую к металлическому основанию, из материала, обладающего большей жесткостью, удастся реализовать плотный контакт стержня и металлического основания. Форма оконечной части стержня, вводимого в пространство волноводов, достаточно хорошо исследована ранее [12]. Особенность реализации формы оконечных частей стержня заключается в том, что скосы выполнены под углом Брюстера в двух плоскостях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью исследования являлась минимизация потерь при возбуждении собственных волн в структуре. При этом экспериментально исследовались вопросы влияния на уровень вносимых потерь значения относительной диэлектрической проницаемости и геометрии стержня, диэлектрической проницаемости и толщины дополнительной диэлектрической подложки. Исследования проводились в диапазоне частот 25...37 ГГц.

На первоначальном этапе исследовались варианты с однородным исполнением диэлектрических стержней. В первом случае стержень выполнялся из фторопласта ( $\epsilon_r = 2,1$ ), а во втором случае из полистирола ( $\epsilon_r = 2,52$ ). В качестве дополнительной диэлектрической подложки использовались ситалловые подложки ( $\epsilon_r = 9,8$ ) со стандартными размерами 60x48 мм и толщинами 0,5 мм и 1 мм.

В качестве базовых параметров были приняты результаты измерений с фторопластовыми стержнями различных размеров и подложкой толщиной 1 мм. При этом вся конструкция с двумя переходами на прямоугольные волноводы обеспечивала суммарные потери на уровне -2,5...-3 дБ при величине  $KCBH \leq 1.9$ .

Серией экспериментов установлен оптимальный размер стержня, равный 7.0x2.0 мм. Уменьшение ширины стержня до 5.2 мм приводит к росту потерь до уровня -4 дБ, дальнейшее уменьшение ширины до величины 4.2 мм приводит к росту потерь до -6 дБ. При этом необходимо отметить сильную изрезанность характеристики: уровень потерь в частотном диапазоне колеблется в интервале  $\pm 2.5$  дБ.

На Рис. 2 и Рис. 3 приведены зависимости затухания от частоты для двух вариантов структур, у которых прилегающая к металлическому основанию часть стержня (3) толщиной 2 мм выполнена из полистирола, а вторая часть толщиной 1 мм – из фторопласта. Первый вариант соответствует толщине дополнительной диэлектрической подложки 1 мм, а второй – толщине 1.5 мм.

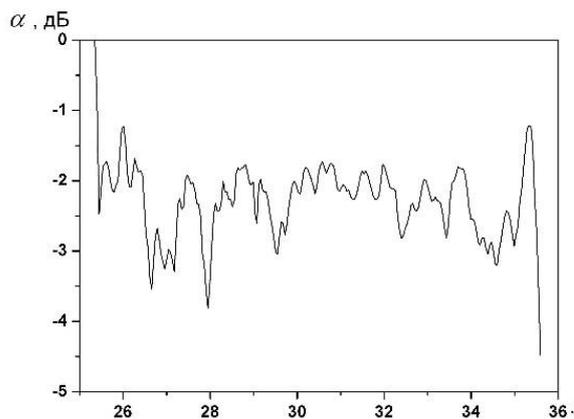


Рис. 2. Зависимость затухания от частоты структуры с диэлектрическим стержнем из полистирола 2,0 мм и фторопласта 1 мм при толщине подложки 1,0 мм.

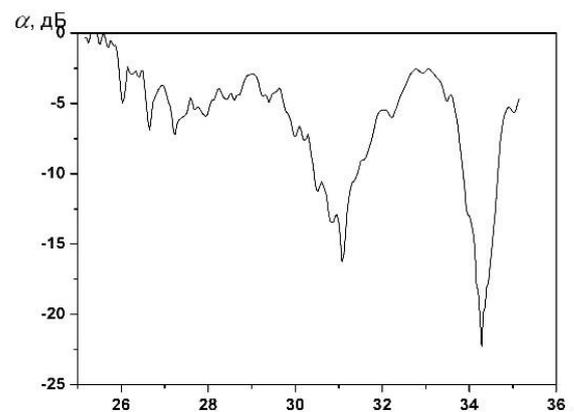


Рис. 3. Зависимость затухания от частоты структуры с диэлектрическим стержнем из полистирола 2,0 мм и фторопласта 1 мм при толщине подложки 1,5 мм.

Очевидно, что средний уровень затухания в достаточно широкой полосе частот не превышает уровень -2 дБ. Можно констатировать, что использование комбинированного диэлектрического стержня с разной диэлектрической проницаемостью позволяет снизить уровень затухания. Размещение материала, обладающего большей жесткостью, со стороны металлической плоскости позволяет существенно повысить уровень воспроизводимости характеристик за счет более равномерного прилегания стержня к металлической плоскости.

Рис. 3 свидетельствует о том, что использование комбинированного стержня и увеличение толщины дополнительной диэлектрической подложки приводит к появлению нескольких резонансных провалов в АХЧ. Так, при толщине 1,5 мм максимальная величина «провала» в характеристике достигает уровня -22 дБ, при этом ширина полосы заграждения невелика (по уровню -20 дБ составляет приблизительно 1%).

Серия экспериментов выявила физический эффект возникновения более глубоких резонансов в сложнопозиционной диэлектрической структуре в более широкой полосе частот. На Рис. 4 представлена АХЧ сложнопозиционной структуры при ее возбуждении оконечной частью диэлектрического стержня полупирамидальной формы длиной 6 мм (что соизмеримо с длиной волны в диэлектрическом стержне). При этом та часть скоса, которая вводилась в металлические волноводы,

выполнялась из сложнокomпозиционного диэлектрика (с теми же параметрами, что и основной волноведущий стержень).

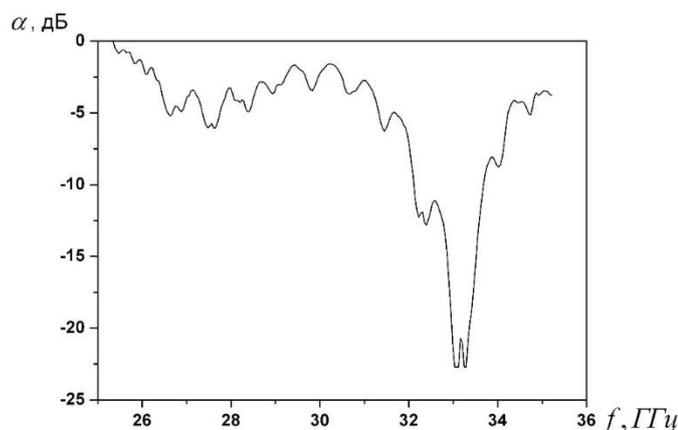


Рис. 4. Зависимость затухания от частоты структуры с диэлектрическим стержнем из полистирола 2,0 мм и фторопласта 1 мм при толщине подложки 1,5 мм со сложнокomпозиционным возбуждающим скосом

Как следует из анализа характеристики на Рис.4, ширина полосы заграждения не только расширилась до 6.2% от центральной частоты, но и сместилась в низкочастотную область более, чем на 700 мГц. В полосе заграждения наблюдается небольшой выброс до -21.7 дБ. Как показали эксперименты, увеличение толщины дополнительной диэлектрической подложки приводит к возникновению полос заграждения в более низкочастотной области. Такой эффект объясняется перераспределением энергии электромагнитных волн между составными элементами структуры.

Еще одним подтверждением того, что исследуемая структура способна поддерживать устойчивый режим распространения собственной волны является структура модуля напряженности электрического поля, измеренного в ближней зоне методом подвижного зонда. Эта характеристика представлена на Рис. 5.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в такого рода структуре при оптимальном выборе ключевых параметров структуры как таковой и элементов возбуждения возможна реализация устойчивого волнового режима с концентрацией поля вблизи стержня ИПДВ, при этом поле вне стержня оказывается достаточно симметричным относительно оси стержня и при удалении от оси стержня амплитуда поля существенно снижается.

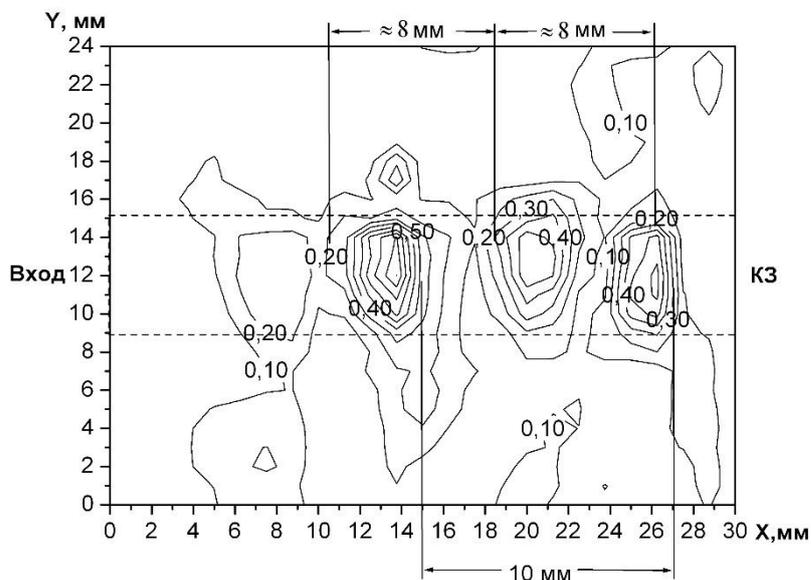


Рис. 5. Структура электрического поля в случае сложнокomпозиционного состава диэлектрического стержня.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований свойств ИПДВ при возможной вариации основных параметров структуры установлено, что наличие известных диэлектрических материалов позволяет создавать волноведущие структуры, обладающие малыми отражениями и вносимыми потерями.

Реализация оптимальных способов возбуждения при оптимальном выборе материальных констант основных элементов тракта позволяет осуществлять не только устойчивый режим канализации энергии электромагнитных волн в КВЧ диапазоне, но и прогнозировать возможность создания частотно-селективных устройств этого диапазона, в том числе и частотно-селективных поверхностей.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы, которая финансируется за счет средств государственного бюджета Министерством образования и науки Украины (номер бюджетной темы 0119U002535).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## Authors' ORCID ID

**S.A. Pogarsky**  <http://orcid.org/0000-0003-0833-1421>

**D.V. Mayboroda**  <http://orcid.org/0000-0002-9564-2369>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knox R.M. Dielectric waveguide integrated circuit an overview / R.M. Knox // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. – 1976. – Vol. 24, No 6. – P. 806-814.
2. Solbach K.E. Band leaky wave antenna using dielectric image line with etched radiating elements / K.E. Solbach // IEEE – MTT–S International Microwave Conference Digest. – 1986. – P. 214-216.
3. Вершинина Л.Н. Диэлектрический полосковый волновод для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн / Л.Н.Вершинина, В.В.Мериякри // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 25, № 7. – С. 1348-1351.
4. McLevige W. New waveguide structures for millimeter wave and optical integrated circuits / W.McLevige, T.Itoh, R.Mittra // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. – 1975. – Vol. 23, No 10. – P. 788-794.
5. Solbach K. The Fabrication of Dielectric Image Lines Using Casting Resins and Properties of the Lines in the Millimeter wave Rang / K.Solbach // IEEE Trans. on MTT. – 1976. – Vol. 24, No 11. – P. 879-881.
6. Crampagne R. Leaky wave antenna using an inverted strip dielectric waveguide / R. Crampagne, L. Padellec, A. Sarremejean // 10th European Microwave Conference. – 1980. – P. 474-479.
7. Rawat B. Computer aided design of inverted strip dielectric waveguide millimeter wave ring-resonator and coupler / S. Rawat, M. Dalmia // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1984. – Vol. 5, № 12. – P. 1527–1542.
8. Itoh T. Inverted strip dielectric waveguide for millimetre-wave integrated circuits / T. Itoh // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1976. –Vol. MTT-24, № 11. – P. 821–827.
9. Mayboroda D. V. The Radiating Unit Based on Hybrid Metal-Dielectric Structure with Bounded Sequence of Transverse Slots / Mayboroda D. V., Pogarsky S. A., Saprykin I. I. // Int. J. of Electromagnetics and Applications. – 2012. – Vol. 2, № 6. – P. 159-162.
10. Mayboroda D. V. The radiator of  $K_u$  -band based on inverted dielectric waveguide / D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky, I. I. Saprykin, S. V. Pshenichnaya // International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. – 2010. – P. 215–217.
11. Mayboroda D. V. A Leaky-wave antenna on the basis of an inverted dielectric waveguide / D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – Vol. 77, № 10. – P. 853-862.
12. Майборода Д.В. Излучающая структура на основе инвертированного диэлектрического волновода с дополнительными элементами /Майборода Д.В., Погарский С.А., Смирнова Е.О. // Вісник Харк. ун-ту ім. В.Н.Каразіна, Сер. Радиофізика та електроніка, 2018. – Вип. 29. – С. 57-63.

## ЗМІСТ

<i>Guo Qiang, Yu Zheng, Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T.</i> Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF doppler radar	3
<i>Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. М.</i> Варіації характеристик радіохвиль ВЧ діапазону над Китаєм, які супроводжували помірний землетрус в Японії 5 вересня 2018 р.	16
<i>Батраков Д. О., Luo Yiyang, Антюфєєва М. С., Шульга С.М., Батракова А.Г.</i> Виявлення порушення контакту між плоскими шарами за допомогою імпульсних георадарів	27
<i>Захаров І.Г., Цимбал А.М.</i> Довготні варіації повного електронного вмісту середньоширотної іоносфери	38
<i>Горобець М.М., Лебедєв А.С.</i> Поля в ближній зоні багатокільцевих антенних решіток з довільною відстанню між випромінювачами	45
<i>Титар В.П., Шпаченко О.В.</i> СКР-лідар для екологічного моніторингу приземного шару атмосфери	57
<i>Майборода Д.В., Погарський С.О.</i> Оптимізація способу збудження інвертованого смушкового хвилеводу з металевією площиною	67

**CONTENTS**

<i>Qiang Guo, Yu Zheng, Chernogor L.F. , Garmash K.P. , Rozumenko V.T.</i> Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF doppler radar	3
<i>Y. Luo, Q. Guo, Y. Zheng,. Garmash K.P, Chernogor L.F. , Shulga S. M.</i> HF radio-wave characteristic variations over China during moderate earthquake in Japan on September 5, 2018	16
<i>Batnikov D.O., Luo Yiyang, Antyufeyeva M.S., Shulga S.N., Batnikova A.G.</i> Detection of delamination between plane layered media using pulse geodars	27
<i>Zakharov I.G., Tsymbal A.M.</i> Longitudinal variations of the total electronic content of the mid- latitude ionosphere	38
<i>Gorobets N.N., Lebedev A.S.</i> Fields in the near zone of the multiple ring antenna arrays with arbitrary distance between radiators	45
<i>Titar V.P., Shpachenko O.V.</i> SRS-lidar for environmental monitoring atmospheric surface layers	57
<i>Mayboroda D.V. , Pogarsky S.A.</i> Optimization of the method for exciting an inverted strip dielectric waveguide with metal plane	67

Наукове видання

ВІСНИК ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
імені В.Н. Каразіна

Серія  
“Радіофізика та електроніка”

Випуск 30

Збірник наукових праць

Українською, російською та англійською мовами

Підписано до друку 24.06. 2019. Формат 60x84/8.

Папір офсетний. Друк цифровий.

Ум. друк. арк. 10.1. Обл.-вид. арк. 8.08. Наклад 50 пр. Зам.№ 82а/19.

---

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

---

Видавець і виготовлювач  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна.  
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3367 від 13.01.2009.