

УДК 550. 388

**КОГЕРЕНТНЫЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ МНОГОТРАССОВЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ****Л. Ф. Черногор¹, К. П. Гармаш¹, Qiang Guo², Yu Zheng³, В. А. Поднос¹,
В. Т. Розуменко¹, О. Ф. Тырнов¹, А. М. Цимбал¹**¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,

Украина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

²Harbin Engineering University

145, Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, China

e-mail: guoqiang@hrbeu.edu.cn

³Qingdao University

308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, China

e-mail: zhengyu@qdu.edu.cn

Поступила в редакцию 10 июня 2018 г.

Разработан и введен в апреле 2018 г. в строй когерентный многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, предназначенный для непрерывного радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения. 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 радиотрасс и их ориентация зависят от специфики решаемых задач. В основе функционирования комплекса лежат измерения доплеровского смещения частоты и амплитуды сигнала. При помощи авторегрессионного алгоритма обеспечивается разрешающая способность по частоте до 0.02 Гц и по времени 7.5 с. После получения временных зависимостей доплеровских спектров для различных трасс производится дальнейшая обработка временных рядов, соответствующих различным модам радиоволны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиофизический мониторинг, когерентный комплекс, наклонное зондирование ионосферы, доплеровские спектры, радиотрассы

Розроблено та введено в квітні 2018 р. в експлуатацію когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, який призначено для безперервного радіофізичного моніторингу динамічних процесів в іоносфері, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження. При розробці комплексу використовувалась 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. В основі функціонування комплексу лежать вимірювання доплерівського зсуву частоти та амплітуди сигналу. За допомогою авторегресійного алгоритму забезпечується роздільна здатність за частотою до 0.02 Гц та за часом 7.5 с. Після отримання часових залежностей доплерівських спектрів для різних трас проводиться подальша обробка часових рядів, які відповідають різним модам радіохвилі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: радіофізичний моніторинг, когерентний комплекс, похиле зондування іоносфери, доплерівські спектри, радіотраси

The coherent multi-frequency multipath radio diagnostic system for oblique incidence probing the ionosphere was developed and placed in operation in April 2018. The system is capable of continuously monitoring ionospheric dynamical processes resulting from space weather variations, impacts on the ionosphere from high-energy sources of space and terrestrial origin. The possibility of observing the dynamical processes in the ionosphere associated with the partial solar eclipse is demonstrated. The system development is based on the software-defined radio (SDR) technology. The radio system is capable of receiving radio signals in the 10 kHz – 30 MHz range of frequencies. The sophisticated software package has been designed that is capable of delivering highly versatile performance. The number of radio propagation paths and their orientation depend on the specifics of problems being solved. The principle of the system operation is based on measurements of the Doppler shift of frequency and signal amplitude. The implementation of Marple's algorithm for autoregression spectrum analysis has provided an increase in the

Doppler resolution down to 0.02 Hz and in a temporal resolution down to 7.5 s. The data on temporal dependences of the Doppler spectra acquired for various propagation paths were subjected to further analysis of the time series corresponding to different radio wave modes.

KEY WORDS: radio monitoring, coherent system, oblique incidence probing the ionosphere, Doppler spectra, radio propagation paths

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера остается основным каналом распространения радиоволн различных диапазонов. Особенностью этого канала есть зависимость его параметров от состояния космической погоды. Космическая погода формируется, прежде всего, процессами на Солнце и, в меньшей степени, процессами на Земле. Определенный вклад в состояние космической погоды могут давать и высокоэнергетические процессы техногенного происхождения [1].

Воздействие источников энерговыделения различной природы на ионосферу обуславливает ее динамику. Изучение динамических процессов в ионосфере важно как для физики геокосмоса, прогнозирования параметров канала распространения, так и для получения сведений об источниках энерговыделения.

Динамические процессы в ионосфере исследуются многими наземными и спутниковыми методами. Спутниковые методы проводят измерения как *in situ*, так и путем просвечивания ионосферы. В последнее время получила развитие GPS-технология изучения динамики ионосферы [2, 3].

Среди наземных методов наиболее информативным является метод некогерентного рассеяния (см., например, [4]). К сожалению, в мире имеется всего около десяти радаров некогерентного рассеяния, большинство из них расположено в Западном полушарии. Только по два радара имеются в Европе (г. Тромсё, Норвегия; г. Харьков, Украина) и Азии (вблизи г. Иркутск, Россия; Qijing, КНР). Из-за высокой стоимости радары некогерентного рассеяния не могут вести непрерывный мониторинг ионосферы (см., например, [5]).

Наибольший объем информации об ионосфере (по крайней мере до максимума слоя F2) получен при помощи сети ионозондов, использующих вертикальное зондирование ионосферы [6 – 9]. Ионозонды расположены по земному шару крайне неравномерно. Кроме того, они дают информацию о динамических процессах в ионосфере над местом расположения ионозонда.

Большими возможностями для исследования в области физики ионосферы, изучения канала распространения радиоволн и динамических процессов в ионосфере обладают средства наклонного зондирования (НЗ) [5, 8, 10 – 20]. В этом случае могут использоваться как собственные радиопередающие устройства [16 – 18, 20], так и сеть радиовещательных станций [5, 8, 11, 14, 20]. При помощи НЗ можно охватить значительные регионы земного шара (вплоть до глобальных), и тем самым изучать динамические процессы в ионосфере над этими регионами. Для дифференциации этих процессов по высоте целесообразно применять различные частоты радиоволн при неизменном месторасположении радиопередающего и радиоприемного устройств. Непрерывный мониторинг динамических процессов в ионосфере становится значительно более дешевым при использовании мировой сети вещательных станций. Отсутствие сети собственных радиопередающих устройств при НЗ ионосферы позволяет сохранять помеховую обстановку на прежнем уровне. Этими соображениями и руководствовались разработчики многочастотного многотрассового радиотехнического комплекса для НЗ ионосферы, описанного ниже.

Средства НЗ ионосферы достаточно давно и успешно используются для изучения динамических процессов [20 – 24].

Для непрерывного мониторинга динамических процессов в ионосфере в Харбинском инженерном университете (КНР) специалистами из этого университета совместно со специалистами из Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина разработан и запущен в работу в 2018 г. когерентный многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс ВЧ диапазона радиоволн. При этом разработчики опирались на опыт авторов [21, 23, 24], создававших подобные комплексы для Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

В отличие от авторов [20], нами используются более протяженные трассы (до 2 тыс. км).

Целью настоящей работы является краткое описание когерентного многочастотного многотрассового радиотехнического комплекса НЗ ионосферы и иллюстрация его работоспособности на примере изучения динамических процессов в ионосфере в период с апреля 2018 г. по настоящее время.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

В основу радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере положены измерения доплеровского смещения частоты (ДСЧ) f_d , или в общем случае – доплеровских спектров (ДС), а также амплитуды отраженного сигнала. Метод доплеровского зондирования обладает высокой чувствительностью к малым и достаточно быстрым изменениям параметров среды. Экспериментально удается выделить доплеровское смещение частоты $f_{d\min} \approx 0.01$ Гц. Тогда при частоте радиоволны $f = 10$ МГц имеем для относительных изменений концентрации электронов $\delta_{N\min} = 10^{-4} - 10^{-3}$. При $f_{d\min} = 0.01$ Гц, $f = 10$ МГц получим, что минимальная скорость движения области отражения радиоволны $v_{\min} = 0.3$ м/с.

При $f_{d\min} = 0.01$ Гц и применении при спектральном анализе преобразования Фурье временное разрешение $\delta t = f_{d\min}^{-1}$ метода составляет 100 с. Использование современных методов спектрального оценивания (например, авторегрессионного анализа), позволяет на порядок повысить разрешающую способность по времени (до $\delta t \approx 7.5$ с). За это время область отражения смещается по высоте на $\Delta z_{\min} = v_{\min} \delta t \approx 2.25$ м. Полученные оценки $\delta_{N\min}$, v_{\min} и Δz_{\min} свидетельствуют о высокой чувствительности метода доплеровского зондирования.

КОМПЛЕКС НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В рамках программы о научном сотрудничестве между Харьковским национальным университетом имени В. Н. Каразина и Харбинским инженерным университетом (ХИУ) в ХИУ (г. Харбин, КНР, 45.78°с.ш., 126.68°в.д.) в апреле 2018 г. в режиме непрерывного мониторинга введен в эксплуатацию когерентный многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс для НЗ ионосферы, использующий технологию программного радио (SDR).

Комплекс предназначен для мониторинга динамических процессов в ионосфере над территорией Китая и за ее пределами, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения.

Аппаратно комплекс состоит из активной антенны, работающей в диапазоне частот $f = 10$ кГц – 30 МГц, широкодиапазонного радиоприемного устройства типа SDR USRP №210 LFRX LRTX и персонального компьютера (рис. 1). Для функционирования комплекса в режиме непрерывного мониторинга разработано оригинальное программное обеспечение, зависящее от круга решаемых задач.

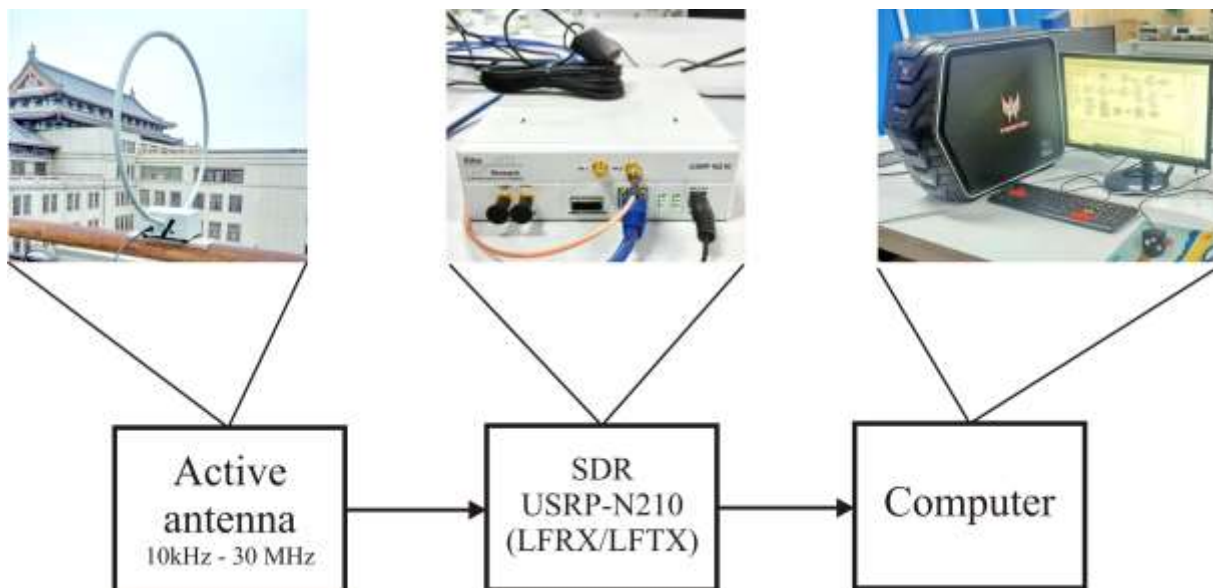


Рис. 1. Фотография комплекса наклонного зондирования ионосферы.

Радиоприемное устройство с помощью вынесенной на высоту около 20 м антенны принимает сигналы сети вещательных станций в диапазоне частот 10 кГц – 30 МГц. Количество радиотрасс и их ориентация зависят от специфики решаемых задач (табл. 1). В настоящих исследованиях использовались 12 радиотрасс различной ориентации (рис. 2).

Для исследования высотной зависимости проявлений динамических процессов в ионосфере для одного и того же географического расположения радиостанций применялись две различные частоты радиоволны. При этом одна радиоволна отражалась в Е-области, а вторая – в F-области ионосферы.

Табл. 1. Сведения о радиотрассах, используемых для наклонного зондирования ионосферы.

Frequency	Location (country, city)	Distance to Harbin	Azimuth	Power	Operational time
5000 kHz	China, Lintong/Pucheng	1876 km	236°	10 kW	00:00 – 24:00 UT
6015 kHz	Korea, Hwaseong	949 km	179°	100 kW	03:30 – 16:20 UT 19:00 – 00:00 UT
6055 kHz	Japan, Chiba/Nagara	1613 km	130°	50 kW	20:25 – 15:00 UT
6080 kHz	China, Hailar	646 km	309°	10 kW	21:50 – 15:00 UT
6175 kHz	China, Beijing	1044 km	234°	100 kW	09:00 – 18:05 UT 20:25 – 24:00 UT
6600 kHz	Korea, Goyang	907 km	179°	50 kW	05:00 – 23:00 UT
7260 kHz	Mongolia, Ulaanbaatar/ Khonkhor	1497 km	286°	50 kW	06:55 – 15:00 UT 22:00 – 05:00 UT
7345 kHz	Russia, Yakutsk/ Tulagino	1844 km	5°	50 kW	09:00 – 14:00 UT 21:00 – 05:00 UT
9500 kHz	China, Shijiazhuang	1310 km	236°	100 kW	20:25 – 18:00 UT
9520 kHz	China, Hohhot	1343 km	251°	50 kW	21:50 – 16:05 UT
9750 kHz	China, Hohhot	1343 km	251°	50 kW	21:50 – 16:05 UT
	Japan, Yamata	1531 km	129°	300 kW	08:00 – 17:00 UT
9830 kHz	China, Beijing	1044 km	234°	100 kW	07:30 – 18:05 UT 20:25 – 02:00 UT

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

В основе функционирования когерентного многочастотного многотрассового комплекса для НЗ ионосферы лежит оценивание спектров доплеровского смещения частоты на интервале времени δt . Измерения на комплексе ведутся непрерывно. Частота оцифровки сигнала составляет 50 отсчетов в секунду. Доплеровские спектры вычисляются на интервале времени $\Delta t = 20$ с. Заметим, что для спектрального оценивания используется авторегрессионный алгоритм [24, 25]. Это позволило существенно повысить разрешающую способность по частоте до 0.02 Гц. Разрешающая способность по времени составляет 7.5 с. В реальном масштабе времени возможна лишь оценка параметров сигнала (рис. 3). Этого оказывается достаточно для решения ряда практических задач.

Далее строится временная зависимость доплеровских спектров для различных радиотрасс. Локальные максимумы ДСЧ в последовательных ДС, соответствующие различным модам радиоволны, выделяются и группируются в отдельные временные ряды. В дальнейшем эти ряды подвергаются последующей обработке (например, системному спектральному анализу, фрактальному анализу и др.).

Результаты измерений на комплексе продемонстрированы на рис. 3.

ВЫВОДЫ

1. Исследователями из ХНУ имени В. Н. Каразина и ХИУ разработан и введен в апреле 2018 г. в строй многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, предназначенный для непрерывного радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения.

2. Успешное функционирование комплекса продемонстрировано на примере исследования динамических процессов в ионосфере, начиная с апреля 2018 г. и по настоящее время.

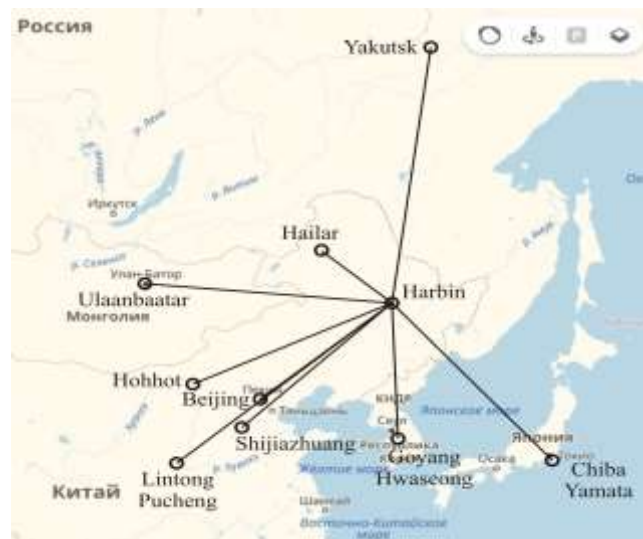


Рис. 2. Радиотрассы, используемые для наклонного зондирования ионосферы.

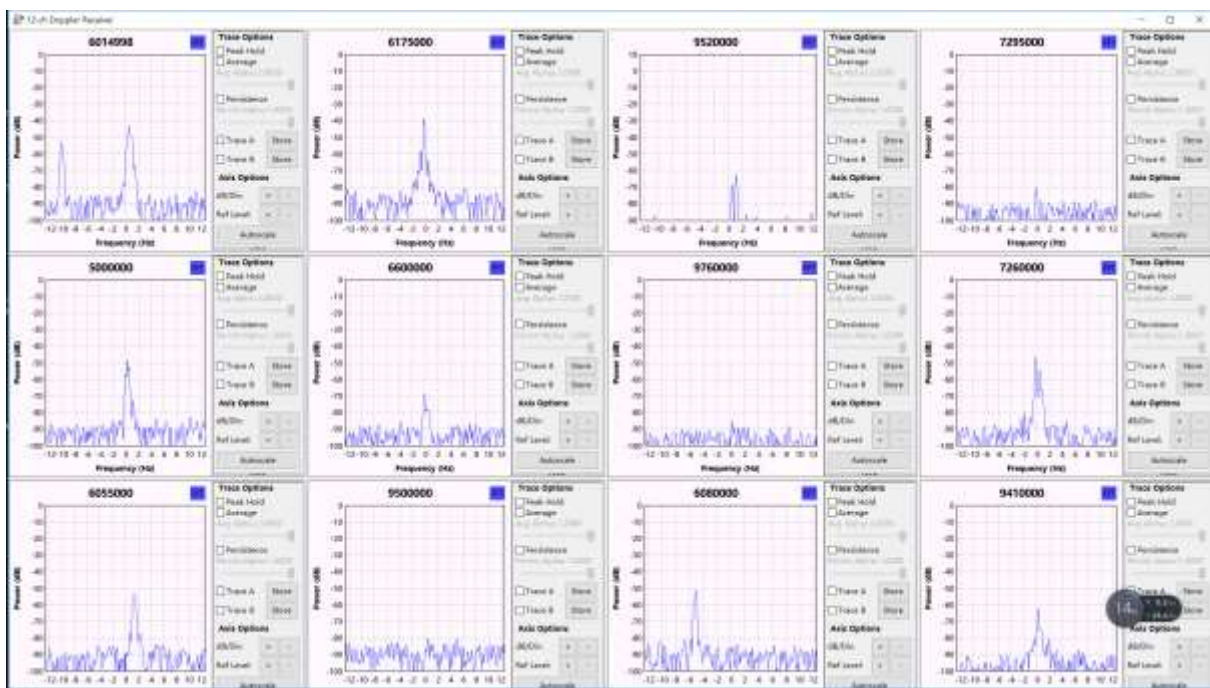


Рис. 3. Пример регистрации ДС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф. Физика геокосмических бурь: Монография / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. – 408 с.
2. Афраймович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Первалова. – Иркутск, 2006. – 480 с.
3. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография / Ю. В. Ясюкевич, Н. П. Первалова, И. К. Едемский, А. С. Полякова. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 259 с.
4. Пуляев В. А. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2011. – 240 с.
5. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs / V. G. Galushko, V. S. Beley, A. V. Koloskov [et al.] // Radio Science. – 2003. – V. 38, №6. – P. 10-1–10-9. doi: 10.1029/2002RS002861.
6. New Digisonde for research and monitoring applications / B. W. Reinisch, I. A. Galkin, G. M. Khmyrov [et al.] // Radio Science. – 2009. – V. 44, №1. – RS0A24, P. 1–15. doi: 10.1029/2008RS004115.

- Chernogor L. F. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage / L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2013. – Vol. 86, No 4. – P. 136 – 139.
7. Reinisch B. W. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) / B. W. Reinisch, I. A. Galkin // *Earth, Planets and Space*. – 2011. – V. 63, №4. – P. 377 – 381.
8. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes / T. Verhulst, D. Altadill, J. Mielich [et al.] // *Advances in Space Research*. – 2017. – V. 60, №8. – P. 1644 – 1656.
9. Макет портативного когерентного ионозонда / А. В. Зализовский, А. С. Кашеев, С. Б. Кашеев [и др.] // *Космічна наука і технологія*. – 2018. – Т. 24, №3 (112). – С. 10 – 22. doi: 10.15407/knit2018.03.010.
10. Chirp Ionosonde and its Application in the Ionospheric Research / V. A. Ivanov, V. I. Kurkin, V. E. Nosov [et al.] // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2003. – V. 46, №11. – P. 821 – 851. doi:10.1023/b:raqe.0000028576.51983.9c.
11. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves / V. G. Galushko, A. S. Kasheev, V. V. Paznukhov [et al.] // *Radio Science*. – 2008. – V. 43, №4, – RS4013, P. 1–10. doi: 10.1029/2007RS003735.
12. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models / M. Pictrella, L. Perrone, G. Fontana [et al.] // *Advances in Space Research*. – 2009. – V. 43, №11. – P. 1611 – 1620.
13. Mlynarczyk J. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting / J. Mlynarczyk, P. Koperski, A. Kulak // *Advances in Space Research*. – 2012. – V. 49, №1. – P. 83 – 88.
14. Paznukhov V. V. Digisonde observation of TIDs with frequency and angular sounding technique / V. V. Paznukhov, V. G. Galushko, B. W. Reinisch // *Advances in Space Research*. – 2012. – V. 49, №4. – P. 700 – 710. doi:10.1016/j.asr.2011.11.012
15. Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation / G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, E. G. Vertogradova [et al.] // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2013. – V. 56, №5. – P. 259 – 275. doi: 10.1007/S11141-013-9431-3.
16. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF sky-wave-multistatic radar / S. Z. Shi, Z. Y. Zhao, J. N. Liu [et al.] // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2014. – V. 11, №7. – P. 1270 – 1274.
17. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities / S. Z. Shi, G. Chen, G. B. Yang [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2015. – V. 53, №4. – P. 2185 – 2194.
18. Shi S. Z. A novel ionospheric oblique-incidence sounding network consisting of the ionospheric oblique backscatter sounder and parasitic oblique-incidence sounder / Shi S. Z., G. B. Yang, Z. Y. Zhao, J. N. Liu // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2015. – V. 12, №10. – P. 2070 – 2074.
19. Observations and modeling of ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle of arrival sounders / A. J. Heitmann, M. A. Cervera, R. S. Gardiner-Garden [et al.] // *32nd URSI GASS, Montreal, 19 – 26 August 2017*. – P. 1–4.
20. Laštovička J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network / J. Laštovička, J. Chum // *Advances in Space Research*. – 2017. – V. 60, №8. – P. 1629 – 1643.
21. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 / К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов [и др.] // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. – 1999. – № 7. – С. 3 – 15.
22. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве / Н. Ф. Благовещенская. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001. – 287 с.
23. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. A. Podnos [et al.] // *Sun and Geosphere*. – 2012. – V. 7, №2. – P. 133 – 139.
24. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах / Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. А. Поднос, О. Ф. Тырнов // *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика, 2013. – С. 160–182.
25. Marple S. L. *Digital Spectral Analysis with applications* / S. L. Marple. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1987. – 512 p.