

## **Трехпозиционный прием ЛЧМ-сигналов при слабонаклонном зондировании ионосферы**

М.В. Цедрик<sup>1,2</sup>, А.В. Подлесный<sup>1,2</sup>, В.И. Куркин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российский новый университет (РосНОУ), 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 22.

<sup>2</sup>ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126А

E-mail: [mark7cedrick@gmail.com](mailto:mark7cedrick@gmail.com)

*Представлены результаты разработки аппаратуры и программного обеспечения синхронной регистрации непрерывных ЛЧМ-сигналов в диапазоне 1.5 – 15 МГц на трех радиотрассах протяженностью 104-120 км. Дано общее описание технических характеристик и диагностических возможностей цифровой регистрации отраженных от ионосферы ЛЧМ-сигналов при разнесенном приеме с базой около 60 км при непрерывном мониторинге со скважностью зондирования 15 секунд. Приведены примеры характерных искажений ионограмм СНЗ в условиях возмущений.*

*Ключевые слова: ионосфера, перемещающиеся ионосферные неоднородности, ионозонд, линейно частотно модулированный сигнал, вертикальное и слабонаклонное зондирование*

## **Three-position reception of LFM signals with quasi-vertically incident sounding of the ionosphere**

M.V. Cedrik<sup>1,2</sup>, A.V. Podlesnyi<sup>1,2</sup>, V.I. Kurkin<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Russian New University ((RosNOU), 22 Radio St., Moscow, 105005.

<sup>2</sup>Institute of Solar–Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS), 126A Lermontova St., Irkutsk, 664033

*The results of the development of equipment and software for synchronous registration of continuous LFM signals in the range of 1.5 - 15 MHz on three 104-120 km long radio paths are presented. A general description of the technical characteristics and diagnostic capabilities of the digital registration of reflected from the ionosphere LFM signals at a spaced reception with a base of about 60 km with continuous monitoring with a probing duration of 15 seconds is given. Examples of characteristic distortions of QVIS ionograms under perturbation conditions are given.*

*Keywords: ionosphere, traveling ionospheric disturbances, ionosounder, vertical and quasi-vertically incident sounding of the ionosphere*

### **Введение**

Разнесенный прием отраженных от ионосферы сигналов при слабонаклонном зондировании ионосферы (СНЗ) успешно используется для исследования характеристик мелкомасштабных и среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в различных регионах [1-3]. Для интерпретации воздействия на ионограммы СНЗ СМ ПИВ с пространственными масштабами более ста км и характерным временем изменения в десятки минут достаточно хорошим приближением является волновая модель неоднородности [2-5]. В рамках такого подхода выявлена связь характеристик СМ ПИВ с направлением ветра в нижележащей атмосфере [6]. Однако, ряд особенностей искажений ионограмм СНЗ и временной их динамики [7-9] не могут быть объяснены без привлечения модели локализованных неоднородных структур. В этом приближении по данным одного ионозонда получены оценки

пространственных характеристик ПИВ и проекции скоростей движения в отдельных экспериментах [10-12]. Поэтому актуальной является задача регистрации характеристик ПИВ с высоким пространственным и временным разрешением в режиме непрерывного мониторинга для выявления их детальных морфологических особенностей и возможных источников.

### Геометрия эксперимента и аппаратная часть

В 2021 году на базе многофункционального ЛЧМ-ионозонда «Ионозонд-МС» [12], расположенного в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (п. Торы, Бурятия), выносного передающего пункта вблизи г. Усолье-Сибирское и выносного приемного пункта в п. Патроны вблизи г. Иркутска (рис.1) был организован непрерывный мониторинг ионосферы в режиме вертикального и слабонаклонного зондирования.

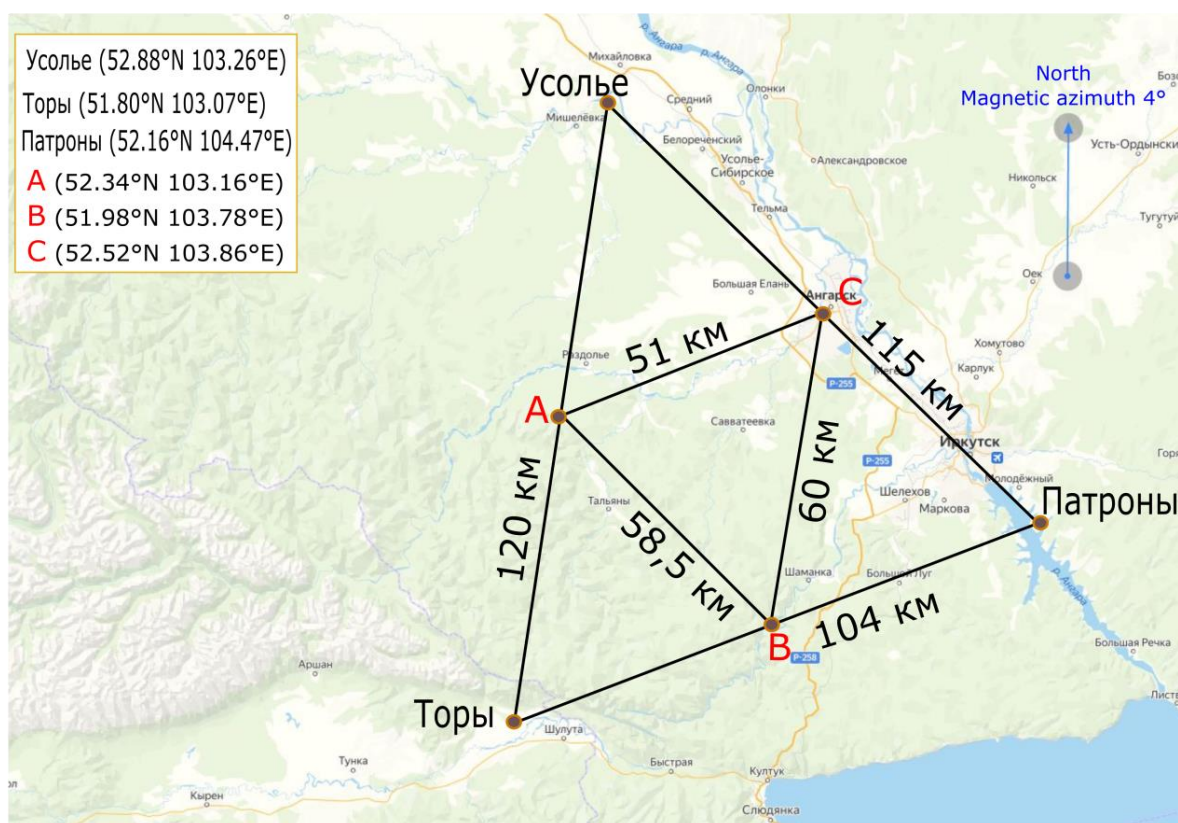


Рис. 1. Схема расположения прямо-передающих пунктов (Усолье, Торы, Патроны и средних точек (А, В и С) радиотрасс СНЗ

Приемная часть комплекса «Ионозонд-МС» имеет до восьми программно-контролируемых независимых приемных каналов и высокий динамический диапазон, свойственный для радиоприемных устройств класса идеальных программных радиосистем. Это позволяет реализовать наблюдения несколькими методами одновременно без разнесения циклограмм их работы.

В эксперименте задействованы два ЛЧМ-передатчика и два приемника. Вместе они образуют три слабонаклонные трассы радиозондирования и реализуют вертикальное зондирование в п. Торы. Координаты размещения и тип оборудования приводятся в таблице 1. Таким образом, реализована синхронная регистрация отраженных ЛЧМ сигналов от областей, отмеченных на рис.1 буквами А, В и С, а также на другом, близком к равностороннему, треугольнике А, В и Торы.

**Таблица 1. Координаты станции и тип размещенного оборудования**

Станция	Координаты	Оборудование	Передающая антенна	Приемная антенна
Усолье	52,88 С.Ш., 103,26 В.Д	Передатчик	Вертикальная дельта	-
Торы	51,8 С.Ш., 103,07 В. Д.	Передатчик и Приемник	Вертикальная дельта	Ортогональные вертикальные дельты
Патроны	52,16 С.Ш., 104,47 В. Д.	Приемник	-	Ортогональные обручи

Из-за своих конструктивных особенностей и различия используемых трасс распространения зондирующего сигнала режимы работы двух используемых передатчиков различались, что отражено в таблице 2.

**Таблица 2 Трассы радиозондирования и параметры режимов зондирования**

Трасса	Начальная частота, МГц	Конечная частота, МГц	Скорость перестройки частоты, кГц/с	Скважность, с	Протяженность, км	Мощность передатчика, Вт
Усолье-Торы	1,5	15	600	60	120	10
Усолье-Патроны	1,5	15	600	60	115	10
Торы-Патроны	1	14	1000	15	104	10
Торы-Торы	1	14	1000	15	Моностат	10

От передающих и приемных антенн требовались однородность амплитудно-частотных характеристик в используемом диапазоне частот, диаграмма направленности, соответствующая углам прихода сигнала при вертикальном и слабонаклонном зондировании, простота в развертывании, наладке и обслуживании.

В качестве передающих антенн в обоих случаях использовались вертикальные дельтаобразные антенны с идентичной геометрией и габаритами, полностью отвечающие выше обозначенным требованиям и хорошо себя зарекомендовавшие. Чертеж такой антенны показан на рис. 2.

Дополнительным требованием к приемным антеннам стала возможность организации на их базе поляриметрической антенной системы, предназначенной для аппаратного разделения магнитоионных компонент отраженного от ионосферы сигнала. На приемном пункте на территории ГФО в поселке Торы роль такой приемной антенны выполняет антенная система, состоящая из двух ортогональных вертикальных дельтаобразных рамочных антенн, подробно описанная в [13]. Эскиз антенной системы приведен на рис. 3.

В виду ограниченности и занятости лесными насаждениями территории обсерватории в поселке Патроны, в качестве приемной антенной системы ЛЧМ-ионозонда используются ортогональные рамочные антенны в форме обручей диаметром 1,5 м, отличающиеся компактностью и быстротой развертывания. Антенная система размещена на высоте 5,5 м от поверхности земли, каждая антенна оснащена усилителем. Чертеж и общий вид антенной системы показан на рис. 4.

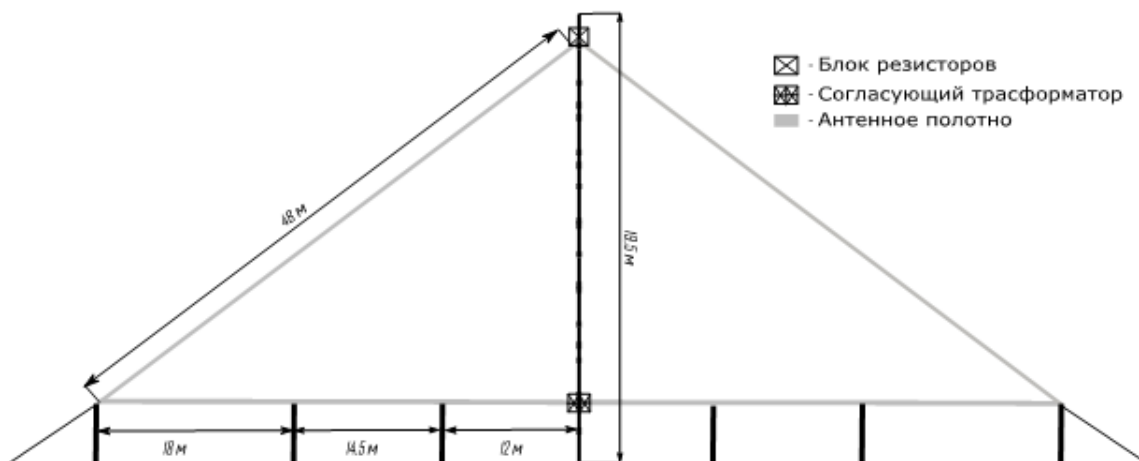


Рис.2. Чертеж передающих антенн

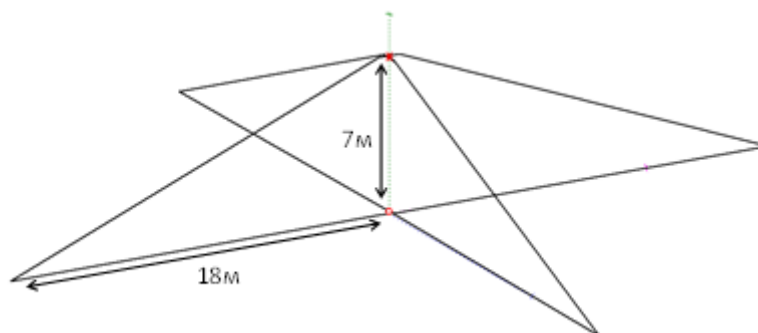
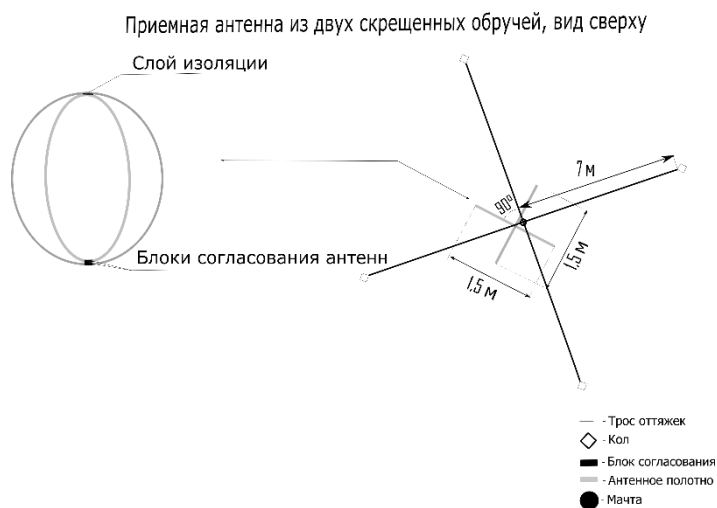


Рис. 3. Эскиз приемной антенной системы в поселке Торы



а)

б)

Рис. 4. Приемная антенная система на базе ортогональных обручей: а) – чертеж, б) – антенная система в поселке Патроны

### Регистрируемые характеристики ЛЧМ сигналов и база данных

Результатом работы системы в режиме непрерывного мониторинга являются файлы ионограмм ВЗ и СНЗ, накапливаемые в базе данных. Регистрируются

поляризационные и амплитудные характеристики сигналов, отраженных от ионосферы, а также передаточная функция ионосферного радиоканала.

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведена серия ионограмм, соответствующих прохождению ПИВ через различные области отражения зондирующих сигналов системы.

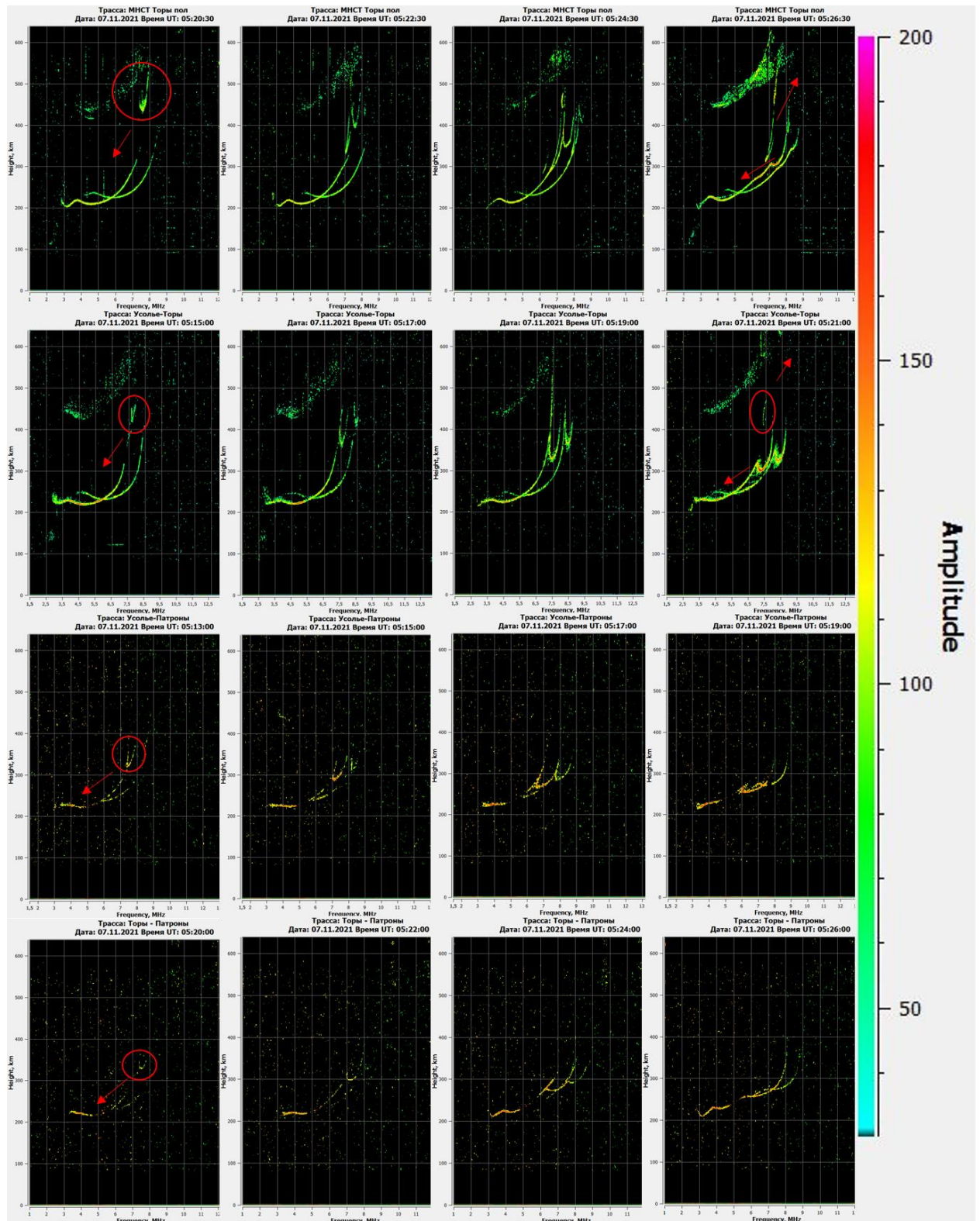


Рис. 5. Прохождение ПИВ, зафиксированное системой трехпозиционного приема

Ионограммы на рис. 5 построены в единой амплитудной шкале и представлены с шагом 120 секунд. Демонстрируется эволюция треков отраженного сигнала при прохождении ПИВ. Для каждой точки отражения сигнала выбрано свое время начала фиксации прохождения ПИВ, соответствующее появлению следа отражения сигнала от возмущения. Направление смещения трека на ионограммах указано стрелками. Для трасс с наиболее высоким качеством сигнала (две верхние панели) можно наблюдать как приближение (движение трека вниз), так и удаление ПИВ, соответствующее движению трека вверх. Из информации, содержащейся на рис. 1 и рис. 5 можно сделать вывод, что наблюдаемое возмущение двигалось с северо-запада на юго-восток.

### **Выводы**

На базе трех обсерваторий организован трехпозиционный прием сигналов слабонаклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в режиме непрерывного мониторинга с высоким временным разрешением. Регистрируются групповые, амплитудные и поляризационные параметры сигналов, прошедших ионосферный радиоканал. Получаемая информация позволит определять параметры перемещающихся ионосферных возмущений с пространственными масштабами менее 100 км.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00299).*

### **Литература**

1. Harris, T., M. Cervera, and D. Meehan (2012), SpICE: A program to study small-scale disturbances in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, A06321, doi:10.1029/2011JA017438.
2. Medvedev, A., K. Ratovsky, M. Tolstikov, S. Alsatkin, A. Scherbakov (2013), Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and Digisonde data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105/106, 350–357.
3. Vybornov, F., O. Sheiner, A. Kolchev, E. Zykov, A. Chernov, V. Shumaev, A. Pershin, On the Results of a Special Experiment on the Registration of Traveling Ionospheric Disturbances by a System of Synchronously Operating Chirp Ionosondes. *Atmosphere* 2022, 13, 84. <https://doi.org/10.3390/atmos13010084>
4. Cervera, M., T. 1. Harris (2014), Modeling ionospheric disturbance features in quasi-vertically incident ionograms using 3-D magnetoionic ray tracing and atmospheric gravity waves, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 431-440, doi:10.1002/2013JA019247.
5. Jiang C., G. Yang, J. Liu, Zhao Z. (2019), A study of the F2 layer stratification on ionograms using a simple model of TIDs, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 124, 1317-1327, doi:10.1029/2018JA026040.
6. Medvedev, A., K. Ratovsky, M. Tolstikov, A. Oinats, S. Alsatkin, and G. Zhrebtsov (2017), Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, doi:10.1002/2017JA024103
7. Munro G., L. Heisler (1956), Cusp Type Anomalies in Variable Frequency Ionospheric Records, *Australian Journal of Physics*, 9(3), 343-358.
8. Выборнов Ф.И., Митякова Э.Е., Рахлин А.В., Крупеня Н.Д. Анализ появляемости перемещающихся ионосферных возмущений типа “серп” на средних широтах // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 1997. Т. 40. №12. С. 1455-1462.
9. Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В., Пежемская М.Д., Чистякова Л.В. Морфологические особенности признаков перемещающихся ионосферных неоднородностей по данным слабонаклонного зондирования ионосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 2. С. 158-163.

10. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Моделирование распространения декаметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2018. Т. 61. №6. С. 462-473.
11. Laryunin O. (2021), Studying characteristics of traveling ionospheric disturbances using U-shaped traces on vertical incidence ionograms, *Advances in Space Research*, 67(3), 1085-1089. DOI 10.1016/j.asr.2020.11.007.
12. Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселёв А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы// Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 24–31.
13. Подлесный А.В., Куркин В.И., Цедрик М.В. Приемная антенная система ионозонда "Ионозонд-МС" // Доклады VII Всероссийской Микроволновой Конференции. Издание JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва 2020. С. 339-342.