

## **Спектральная структура диагностических сигналов, рассеянных на МИИН при изменении мощности излучения КВ нагревного стенда EISCAT/Heating**

Т.Д. Борисова<sup>1</sup>, Н.Ф. Благовещенская<sup>1</sup>, А.С. Калишин<sup>1</sup>, И.М. Егоров<sup>1</sup>,  
С.А. Долгачева<sup>1</sup>, А.С. Ковалев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.  
E-mail: [borisova@aari.ru](mailto:borisova@aari.ru)

*Представлены результаты исследований процессов взаимодействия ионосферы и магнитосферы Земли в период эксперимента 26 октября 2021 г. с использованием нагревного стенда EISCAT/Heating (г.Тромсе, Норвегия). Возбуждение искусственных возмущений наблюдалось в плазме верхней (F- области) авроральной ионосферы при воздействии мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации. В период эксперимента проводились одновременные измерения методом ракурсного рассеяния радиоволн на четырех диагностических КВ радиотрассах. При анализе использовались данные наземных магнетометров. Зарегистрированы волновые возмущения в поведении смещений доплеровских частот диагностических КВ радиосигналов и измерений наземными магнетометрами с периодами (120–900) с, соответствующими пульсациям Pc4 и Pc5.*

*Ключевые слова: модификация ионосферы, радиоволны необыкновенной поляризации, диагностические КВ радиосигналы, наземные магнетометры, волновые возмущения, пульсации Pc4 и Pc5*

## **Spectral structure of diagnostic signals scattered at the MIIN by changing the HF radiation power of the EISCAT/Heating heating facility**

T.D. Borisova<sup>1</sup>, N.F. Blagoveshchenskaya<sup>1</sup>, A.S. Kalishin<sup>1</sup>, I.M. Egorov<sup>1</sup>, S.A. Dolgacheva<sup>1</sup>, A.S. Kovalev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute.

*The results of studies of the processes of interaction between the ionosphere and the magnetosphere of the Earth are presented, when artificial disturbances are excited in the plasma of the upper (F-region) auroral ionosphere by a powerful HF radio wave of extraordinary polarization from the EISCAT/Heating heating facilities (Tromso, Norway). The excitation of artificial disturbances was observed in the plasma of the upper (F-region) auroral ionosphere under the influence of powerful HF radio waves of extraordinary polarization. During the experiment, simultaneous measurements were carried out using the method of aspect scattering of radio waves on four diagnostic HF radio paths. The analysis used data from ground-based magnetometers. Wave disturbances were recorded in the behavior of Doppler frequency shifts of diagnostic HF radio signals and measurements by ground-based magnetometers with periods (120–900) s corresponding to the pulsations of Pc4 and Pc5.*

*Keywords: modification of the ionosphere, radio waves of extraordinary polarization, diagnostic HF radio signals, ground-based magnetometers, wave disturbances, pulsations of Pc4 and Pc5*

### **Введение**

Геомагнитные пульсации Pc4-Pc5 демонстрируют проявления МГД волновой активности в околоземном космическом пространстве. Возбуждение пульсаций Pc4 (0.7 - 2.5 мин) характерно для магнитоспокойных условий. Пульсации Pc5 (2.5 - 10 мин), в основном, наблюдаются в высоких и авроральных широтах и типичны для восстановительной фазы суббури. Как правило, возбуждение этих волн в утреннем секторе сопровождается

одновременным развитием магнитосферной суббури в ночном секторе. К настоящему времени общепринято, что классические утренние и дневные Pc5 пульсации в магнитосфере, как и Pc4, представляют собой тороидальные альвеновские резонансные колебания силовых линий геомагнитного поля [1]. Геомагнитные пульсации Pc6 с периодами 10 мин и выше связаны с возбуждением резонансных колебаний силовых линий магнитного поля Земли.

Исследования параметров пульсаций проводятся по данным наземных магнитных наблюдений и непосредственно на высотах ионосферы (спутники, радары). Использование КВ нагревных комплексов и метода ракурсного (или обратного) рассеяния диагностических КВ радиосигналов на мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностях (МИИН) также позволяет исследовать характеристики волновых возмущений в ионосфере [2, 3, 4]. При распространении КВ радиосигналов через искусственно возмущенную область (ИВО) ионосферы, заполненную искусственными магнитно-ориентированными ионосферными неоднородностями, наблюдается эффект ракурсного рассеяния. Движение ионосферных неоднородностей вызывает смещение частоты рассеянного диагностического сигнала. В измерениях доплеровским методом можно определить проекцию скорости движения ионосферных неоднородностей  $V_{\Delta k}$  на направление вектора рассеяния  $\Delta k = k_s - k_0$  (разность между волновыми векторами падающей,  $k_0$ , и рассеянной,  $k_s$ , КВ радиоволн), движущихся в ИВО ионосферы [5]. Проекция скорости движения МИИН на направление вектора разности  $\Delta k = k_s - k_0$  определяется выражением:

$$V_{\Delta k} = (f_D / f_{\text{диагн}}) \cdot (c / 2 \sin(\theta/2)), \quad (1)$$

где  $f_D$  – доплеровское смещение частоты,

$f_{\text{диагн}}$  – частота диагностической радиоволны,

$c$  – скорость света,

$\theta$  – угол ракурсного рассеяния.

Минимальный поперечный направлению магнитного поля размер рассеивающих МИИН  $l_{\perp}$ , определяется выражением:

$$l_{\perp} = \lambda / 2 \sin \theta, \quad (2)$$

где  $\lambda = c / f_{\text{диагн}}$  – длина волны диагностической КВ радиоволны.

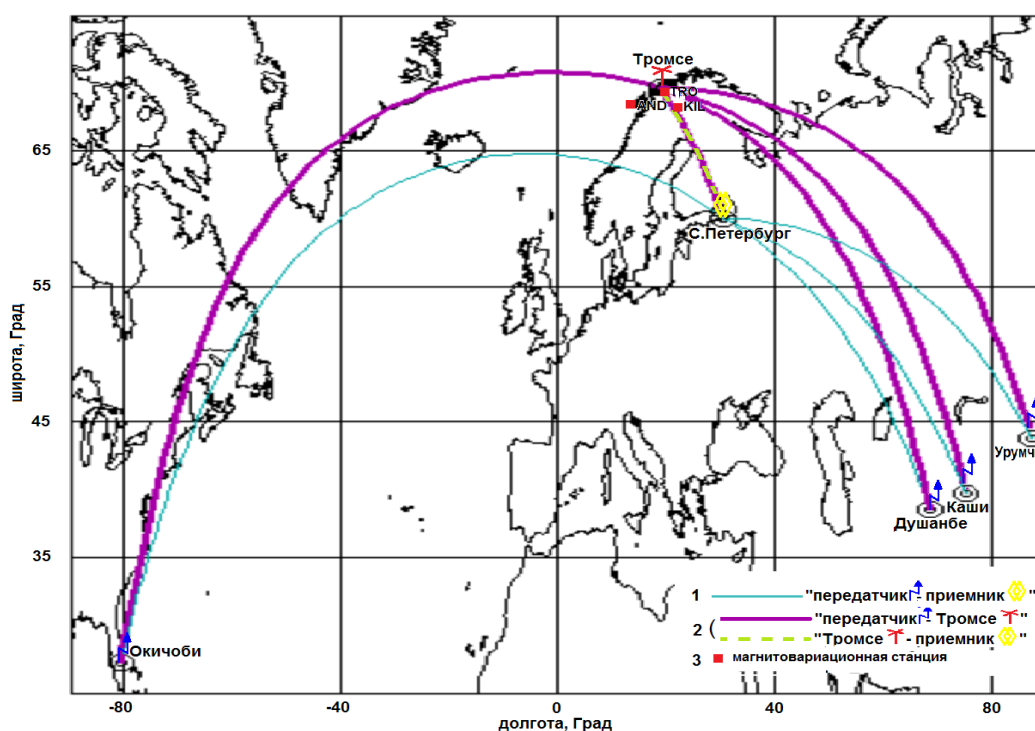
### Результаты наблюдений

Представлены данные экспериментальных измерений 26 октября 2021 г. в период с 14 до 15 UT при модификации ионосферы мощным нагревным стендом EISCAT/Heating (г.Тромсе, Норвегия). Геомагнитные условия в период наблюдений были спокойными, трехчасовой индекс магнитной активности  $K_p=1$ - и солнечная активность характеризовалась числом Вольфа  $W=81$ . Значения критических частот ионосферы слоя F2,  $f_oF2$ , по данным наблюдений станцией вертикального зондирования г.Тромсе, постепенно уменьшались от 6 МГц в 14 UT до 5.5 МГц в 15 UT. Нагревной сигнал необыкновенной (х-моды) поляризации на частоте накачки  $f_H = 5.423$  МГц (без модуляции) излучался циклами 5 мин нагрев/5 мин пауза или 2 мин нагрев/2 мин с 14.20 до 15.00 UT. В период излучения циклов +2/-2 минуты в каждом цикле изменялась излучаемая мощность нагревного стенда  $P_{\text{эфф}} = (10\ 25\ 50\ 75\ 100\ 100\ 75\ 50\ 25\ 10)\% P_{\text{max}} \sim 600$  MW.

Наблюдения искусственных неоднородностей в ионосфере над Тромсе проводились на четырех диагностических радиотрассах методом ракурсного рассеяния диагностических КВ радиосигналов многоканальным доплеровским комплексом, расположенным вблизи С.-Петербурга на расстоянии 1150 км от Тромсе [6]. Характеристики диагностических КВ радиотрасс приведены в Таблице 1. Карта, поясняющая взаимное расположение диагностических трасс и нагревного комплекса EISCAT/Heating, приведена на рис. 1.

**Таблица 1. Характеристики диагностических КВ радиотрасс: названия и географические координаты пунктов передачи, частоты диагностических передатчиков, протяженности диагностических трасс (передатчик – приемник, передатчик – ИВО, передатчик – ИВО – приемник). Указаны также рассчитанные для эксперимента 26 октября 2021г.: углы ракурсного рассеяния  $\theta$ , минимальные размеры  $l_{\perp}$  МИИН и азимуты разностных векторов  $\Delta k$ .**

Приемник широта, долгота	Передатчик широта, долгота	$f_{\text{диагн.}}$ , МГц $\theta$ , град $l_{\perp}$ , м	D, км «Репер – СПб»	D, км «Репер – ИВО»	D, км «Репер - ИВО- СПб»	Азимут $\Delta k$ , град
Ст. "Горьков ская" (вблизи С.Петербур- бурга) 59.9° с.ш.; 30.3° в.д.	Окичоби 27.2° с.ш.; -80.9° з.д.	21.525 $\theta=38$ $l_{\perp}=11$	8462	7541	8691	35
	Душанбе 38.5° с.ш.; 68.8° в.д.	15.515 $\theta=148$ $l_{\perp}=18.5$	3596	4508	5658	125
	Каши 39.4° с.ш.; 75.8° в.д.	15.410 $\theta=138$ $l_{\perp}=15$	3866	4682	5832	121
	Урумчи 43.8° с.ш.; 87.6° в.д.	15.590 $\theta=124$ $l_{\perp}=11$	4145	4694	5844	119



**Рис.1. Карта – схема геометрии эксперимента 26 октября 2021 г. 1 – трассы прямого распространения КВ сигнала, 2 – трассы ракурсного рассеяния, 3 – наземные магнитовариационные станции.**

Анализ измерений методом ракурсного рассеяния выполнен с использованием данных наземных наблюдений магнитного поля Земли магнитометрами IMAGE сети Скандинавии (станции: Тромсе, аббревиатура – TRO; Анденес, AND; и Килпис'ярви,

KIL; <https://space.fmi.fi/image/www/index.php>). Отметим, что 25 и 26 октября 2021г. наблюдались возмущения (суббури) в X- и Y-компонентах магнитного поля Земли: 25 октября около 100 нТ и 26 октября ~ 200 нТ после 20 UT.

### Результаты наблюдений

На рис. 2,а показаны динамические доплеровские спектры (сонограмма) КВ радиосигнала диагностической частоты  $f_{\text{диагн.}} = 21.525$  МГц, измеренные 26 октября 2021г. методом ракурсного рассеяния на трассе Окичоби - Тромсе - С.Петербург. Циклы нагрева и относительный уровень излучаемой мощности стенда EISCAT/Heating,  $P_{\text{эфф}}$ , показаны на оси времени. Азимутальное направление вектора разности ракурсно рассеянного сигнала передатчика Окичоби  $\Delta k_o = k_s - k_o$  для данных измерений составил  $35^\circ$ .

На сонограмме доплеровские ракурсно- рассеянные сигналы регистрировались на частотах  $f_D$ , смещенных в положительную сторону доплеровского спектра от прямого сигнала, формировали "треки" с шириной спектрального рассеяния 1.5 – 2.5 Гц и характеризовались волновыми вариациями  $f_D(t)$  с периодами 5 – 5.5 минут. Периоды колебаний  $f_D$  были близки одному из периодов колебаний относительных изменений  $\Delta X$ - компоненты магнитного поля Земли: 5 и 10 мин. На рис.2 б приведены одновременные вариации во времени относительных изменений  $\Delta X$ - компоненты магнитного поля Земли, измеренной на магнитовариационных станциях TRO, AND и KIL <https://flux.phys.uit.no/ArcMag/>, и оцифрованные значения  $f_D$  диагностического радиосигнала передатчика из Окичоби, по данным измерений доплеровским методом. Вариации  $f_D$  следуют за изменениями X- компоненты.

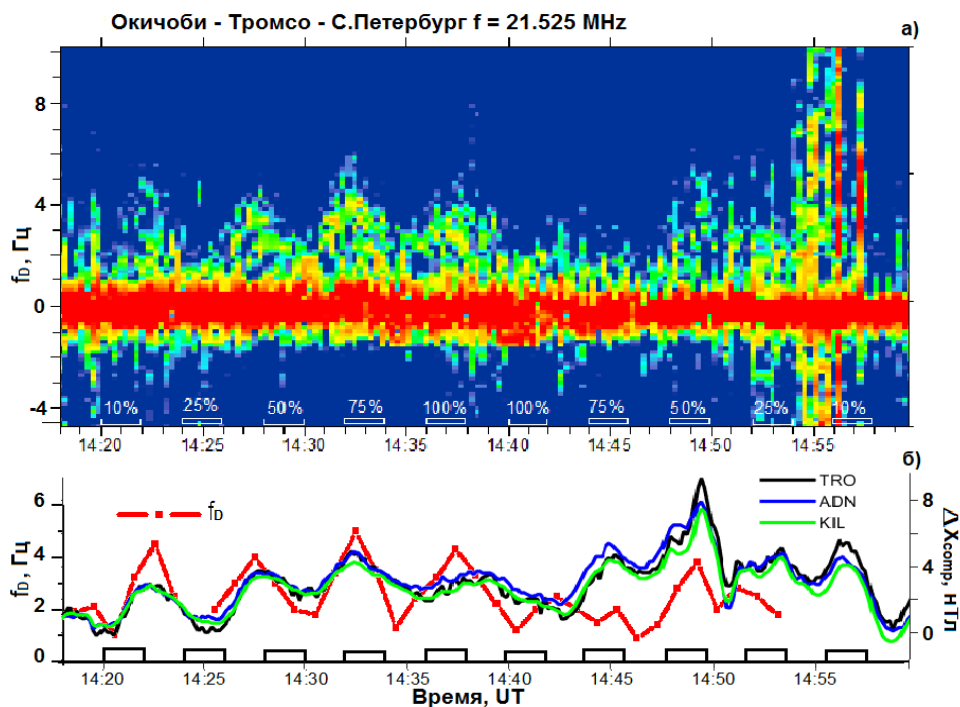
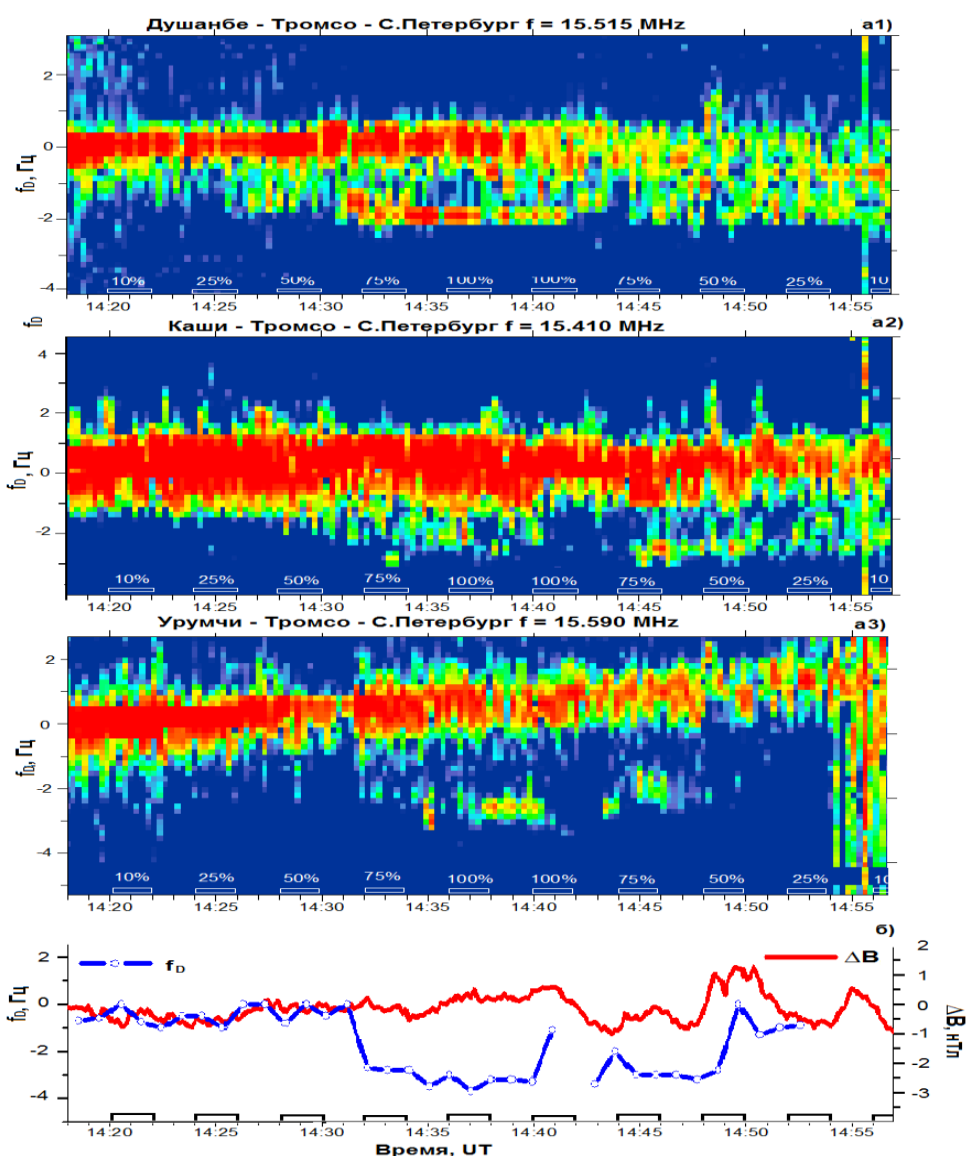


Рис.2. Сонограмма диагностического КВ радиосигнала на трассе Окичоби – Тромсе – С. Петербург,  $f_{\text{диагн.}} = 21.525$  МГц а); вариации оцифрованных значений  $f_D$  радиостанции Окичоби и  $\Delta X$ - компоненты магнитного поля Земли станций TRO, AND, KIL б). Циклы нагрева и относительный уровень излучаемой мощности КВ радиоволны отмечены на оси времени.

На рис.3 а1, а2, а3 приведены сонограммы диагностических КВ радиосигналов, измеренных в этот же период 26 октября 2021г. на диагностических трассах, передатчики которых расположены в регионе Средней Азии (см. табл.1, рис. 1).



**Рис.3.** Сонограммы диагностических КВ радиосигналов на трассах: Душанбе – Тромсе – С. Петербург,  $f_{\text{диагн}} = 15.515$  МГц а1); Каши – Тромсе – С. Петербург,  $f_{\text{диагн}} = 15.410$  МГц а2); Урумчи – Тромсе – С. Петербург,  $f_{\text{диагн}} = 15.59$  МГц а3); вариации оцифрованных значений  $f_D$  радиостанции Урумчи и  $\Delta B$  магнитного поля Земли станции TRO б). Циклы нагрева и относительный уровень излучаемой мощности КВ радиоволны отмечены на оси времени.

На сонограммах ракурсно- рассеянные сигналы регистрировались на частотах  $f_D$ , смещенных в отрицательную сторону от «прямого» сигнала ( $f_D = 0$ ) и формировали "треки" с шириной спектрального рассеяния 2 – 2.5 Гц. Азимуты разностных векторов  $\Delta k$  передатчиков из Азии находились в диапазоне 119-125° и были близки к ортогональным направлениям относительно  $\Delta k_0$ . По результатам измерений выявлены периоды волновых вариаций  $f_D(t)$ , которые составили: 10-12 мин для диагностического радиосигнала передатчика из Урумчи; 12-14 мин – из Душанбе и 13-15 мин – из Каши. Исследования вариаций во времени Y- компоненты магнитного поля выявили

волновые периоды 5 и 10-11 мин, как и в X- компоненте. На рис.3 б приведены одновременные вариации во времени относительных изменений модуля вектора магнитной индукции поля Земли -  $\Delta B$ , измеренного на станции TRO, и оцифрованных значений  $f_D$  диагностического радиосигнала передатчика из Урумчи. Результаты спектрального анализа вариаций  $\Delta B$  определили наличие периодов 5, 8, 14, 21 мин. Наблюдается подобие периодов колебаний  $f_D$  с периодами  $\Delta B$ .

На сонограммах рис.2 и 3 ракурсно - рассеянные сигналы на смещенных частотах  $f_D$  26 октября 2021 г. с 14.20 до 15 UT наблюдаются на всех диагностических радиотрассах, как в периоды нагрева, так и в периоды пауз. Данное явление объясняется особенностью характеристик возбуждения и релаксации МИИН при воздействии на ионосферу мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации [7]. В рассеянии диагностических КВ радиосигналов участвовали МИИН с размерами  $L_{\perp}$  от 11 - 18.5 м. В данном эксперименте с изменением мощности  $P_{эфф}$  нагревного стенда EISCAT/Heating МИИН регистрировались на частоте передатчика из Окичобе весь период наблюдения. Для азиатских передатчиков смещенные частоты выявлялись при излучении мощности передатчика  $P_{эфф} \geq 50\% P_{max}$ .

### **Выводы**

Результаты экспериментов по нагреву высокоширотной ионосферы стендом EISCAT/Heating (г.Тромсё) показали, что сочетание искусственной возмущенной области ионосферы, возбужденной КВ нагревным стендом, и наблюдений методом ракурсного рассеяния диагностических КВ радиосигналов является успешным методом идентификации и изучения стимулированных и естественных сверхнизкочастотных волн в диапазоне Pc3-5 (30-600с и выше) в высоких широтах.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>.*

### **Литература**

1. Клейменова Н.Г. В.А. Троицкая - основатель школы по изучению геомагнитных пульсаций // Физика Земли. 2018. № 5. С. 3–12.
2. Yeoman T.K., Wright D.M., Robinson T.R., Davies J.A., Rietveld M. High spatial and temporal resolution observations of an impulse-driven field line resonance in radar backscatter artificially generated with the Tromso heater. // Ann. Geophysicae. 1997. V. 15. P.634-644.
3. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Корниенко В.А., Рьетвельд М. Определение вектора скорости ионосферных неоднородностей по данным доплеровских измерений в искусственно модифицированной F области полярной ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 47. №1. С. 76-84.
4. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Корниенко В.А., Рьетвельд М.Т. Характеристики пульсаций диапазона Pc4-5, полученные методом ракурсного рассеяния КВ радиоволн с использованием КВ нагревного стенда EISCAT/Heating и наземными магнитометрами // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51. № 5. С. 630–642.
5. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. –М.: Наука. 1984. 392с.
6. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов //Метеорология и гидрология. 2021. №4. с. 22-36.
7. Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Характеристики мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F- области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ- радиоволн необыкновенной поляризации. // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т.59. № 6. С.759-773.