

## РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЕННОЙ НАГРЕВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ

И. В. Крашенинников<sup>1</sup>, Ф. И. Выборнов<sup>2</sup>, А. В. Шиндин<sup>2</sup>, В. П. Урядов<sup>2</sup>, М. Е. Гушин<sup>2,3</sup>,  
Л. Б. Бовин<sup>4</sup>, Г. Г. Вертоградов<sup>5</sup>, А. А. Колчев<sup>6</sup>, Е. Ю. Зыков<sup>6</sup>, В. В. Шумаев<sup>7</sup>,  
Г. А. Чернов<sup>7</sup>, И. М. Кириллов<sup>8</sup>, В. Ю. Дорошенко<sup>9</sup>

<sup>1</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
г. Москва, г. Троицк, Россия  
E-mail:krash@izmiran.ru*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

<sup>3</sup> *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

<sup>4</sup> *Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем,  
г. Приозерск, Ленинградская область, Россия*

<sup>5</sup> *Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

<sup>6</sup> *Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия*

<sup>7</sup> *АО «СИТКОМ», г. Йошкар-Ола, Россия*

<sup>8</sup> *Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

<sup>9</sup> *Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия*

**Аннотация.** Представлены результаты целенаправленных экспериментальных исследований пространственного проявления анизотропии взаимодействия диагностического радиоизлучения коротковолнового диапазона и мелкомасштабного заполнения возмущенной нагревным излучением области ионосферы. Показаны сильная пространственная анизотропия, резонансный характер ракурсного рассеяния, существование устойчивых и слабоустойчивых зон приема. Обнаружен специфический эффект рефракции в крупномасштабной области возмущения электронной плотности, определяемой диаграммой направленности антенны стенда «Сура».

**Ключевые слова:** ионосфера; ЛЧМ-ионозонд; наклонное радиозондирование; ионограмма НЗ

## RADIO SOUNDING OF AN ARTIFICIALLY DISTURBED HEATING REGION OF THE IONOSPHERE WITH SPATIALLY SEPARATED RECEPTION

I. V. Krasheninnikov, F. I. Vybornov, A. V. Shindin, V. P. Uryadov, M. E. Gushchin, L. B. Bovin,  
G. G. Vertogradov, A. A. Kolchev, E. Yu. Zykov, V. V. Shumaev, G. A. Chernov,  
I. M. Kirillov, V. Yu. Doroshenko

**Abstract** We present the results of special experimental studying the peculiarities of spatial manifestation of anisotropic interaction of diagnostic short-wave radio waves and small-scale induced filling in ionospheric region perturbed by high power heating radiation. Strong spatial anisotropy, resonance nature of aspect-angle scattering, existence of stable and weakly stable reception zones are shown. A specific refraction effect in the large-scale region of electron density perturbation, determined by the antenna directional diagram of the Sura facility, was detected.

**Keywords:** ionosphere; LFM-ionosonde; oblique radio sounding; OS ionogram

### Введение

Нелинейное взаимодействие мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой приводит к генерации широкого спектра плазменных неоднородностей, в частности: а) образованию крупномасштабного возмущения, определяемого диаграммой направленности антенн передающего комплекса; б) мелкомасштабному заполнению как следствию турбулизации электронной компоненты и плазменных неустойчивостей в нагретой области ионосферы [1]. В условиях наличия выделенного направления в пространстве – геомагнитного поля – мелкомасштабные неоднородности электронной плотности вытягиваются вдоль магнитного поля [1] и, соответственно, проявление их влияния на проходящие радиоволны приобретает анизотропный характер как следствие, проистекающее из теории дифракции на вытянутом теле вращения [2]. При падении исходной волны под некоторым углом к оси образуются две вторичные волны: вперед (forward)

и назад (backward), направленные под углом падения [2], и амплитуда дифракционного поля волн зависит от полярного угла в конусе переизлучения. Данный тип формирования волнового поля имеет резонансный характер – максимальные значения достигаются при определенном соотношении длины волны и продольного размера неоднородностей и соотношениях волновых векторов в центре возмущенной области.

В данной работе представлены результаты направленных исследований: а) анизотропного характера рассеяния диагностического излучения на мелкомасштабном заполнении ВО; б) проблемы устойчивости и предсказуемости эффекта в геометрии пунктов излучения-приема и локализации ВО; в) радиофизического проявления крупномасштабной структуры ВО.

### Экспериментальные результаты

В сентябре – ноябре 2022 г. была предпринята серия экспериментов, являющихся развитием работы [4] и направленных на исследование пространственного проявления неизотропности взаимодействия диагностического радиоизлучения коротковолнового диапазона и мелкомасштабного заполнения ВО и возможных резонансных свойств ракурсного рассеяния в ситуации, когда длина волн сравнима с масштабом мелкомасштабных неоднородностей возмущенной области. Облучение области ионосферы, возмущенной мощным вертикальным излучением нагревного стенда «Сура», производилось из пункта Москва (ИЗМИРАН) сканирующим ЛЧМ-сигналом и приемом на сети пунктов, которые можно разделить на две группы: ближнюю зону (~ 180 км от стенда: Нижний Новгород, Казань, Йошкар-Ола) и дальнюю (~ 600–1000 км: Ростов-на-Дону, Воронеж и Приозерск, Ленинградской области).

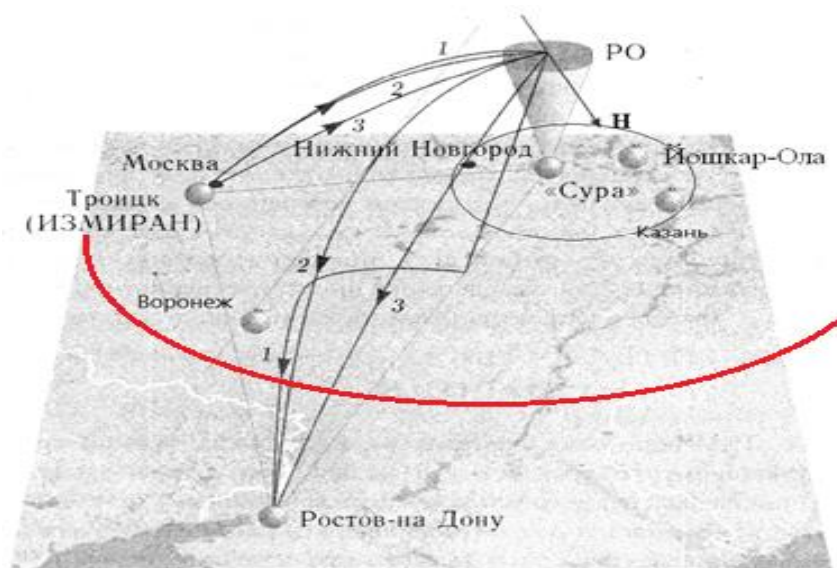


Рис. 1. Геометрия проведения целенаправленных исследований по диагностике искусственно возмущенной области ионосферы мощным нагревным излучением стенда «Сура». Пункт излучения – ИЗМИРАН (Москва, Троицк); прием в пунктах: ближняя зона – Нижний Новгород, Казань и Йошкар-Ола; дальняя зона – Воронеж, Ростов-на-Дону, Приозерск. Линией отмечено пространственное положение наиболее вероятных точек потенциальной регистрации ракурсного рассеяния

Стенд «Сура» в ходе экспериментов работал на полной мощности с циклом 20 минут (10 минут – нагрев, 10 минут – пауза) и сдвигом в 1 минуту от начала часа. Диагностическое ЛЧМ-радиозондирование выполнялось в диапазоне 3–25 МГц с циклами по 5 минут, со скоростью перестройки 100 кГц/с. То есть в интервале нагрева и паузы проходило по два сеанса радиофизической диагностики состояния ионосферы.

Рис. 2 иллюстрирует регистрацию сигнала ракурсного рассеяния в Воронеже (верхняя панель) и Ростове-на-Дону 18.11.2022 во время работы нагревного стенда (14:41 UT) и в его отсутствие в паузе (14:51 UT). Более детально структура следа ракурсного сигнала с энергетическими характеристиками представлена на рис. 3, из которого хорошо виден резо-

нансный характер рассеяния на упорядоченных неоднородностях ВО – соотношения интенсивностей рассеянного и прямого прохождения радиоволн более чем на 2 порядка различаются для Воронежа и Ростова-на-Дону. Для Воронежа отношение SNR ракурсного сигнала практически сопоставимо с прямым регулярным ионосферным прохождением радиоволн (рис. 3, левая панель), что отражает существование определенных условий, при которых эффект резко возрастает. В это же время в пунктах ближней зоны не регистрируется никаких следов в частотном интервале существования ракурсного сигнала в Воронеже и Ростове-на-Дону – 10–15 МГц. В следах ракурсного сигнала видна положительная частотная зависимость группового запаздывания (растет с ростом частоты), что является признаком backward волны. Для forward волны частотная зависимость обратная, что можно видеть на рис. 4 для Приозерска и данный тип является слабоустойчивым в силу слабой устойчивости прохождения верхнелучевыми модами в фоновой ионосфере, что необходимо для реализации переноса специфически ориентированного волнового поля в северо-западном направлении, учитывая наклонение и склонение геомагнитного поля.

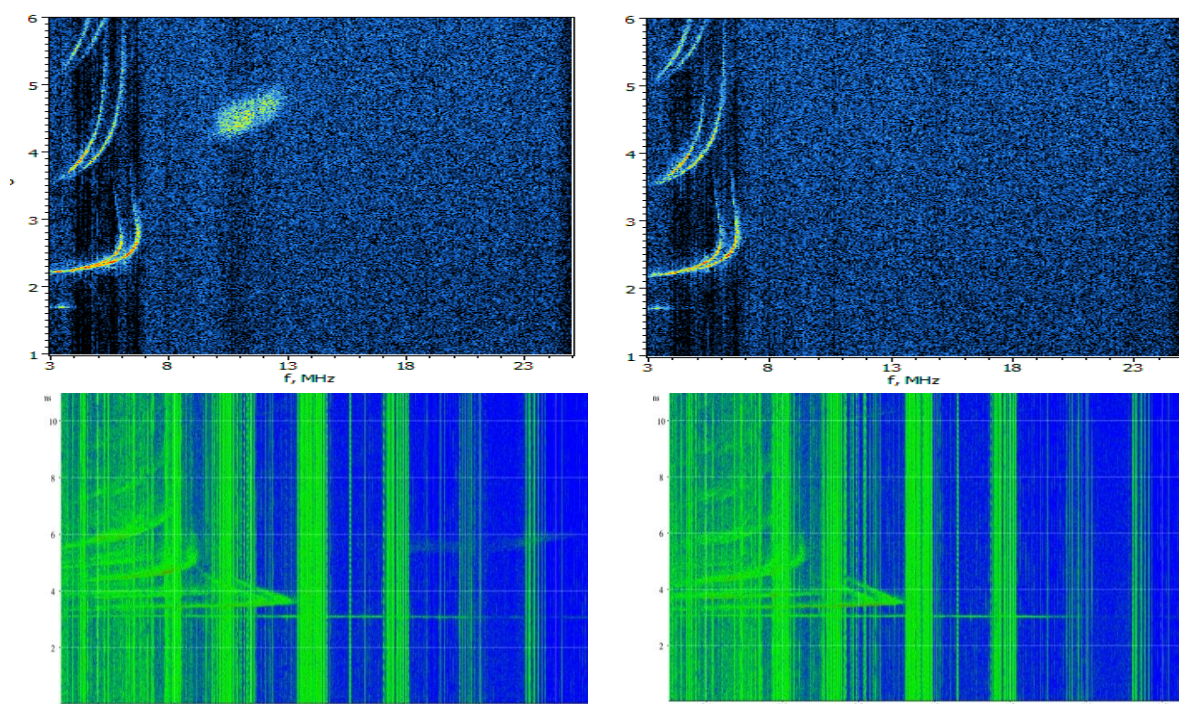


Рис. 2. Регистрация ракурсного рассеяния (backward волна) 18.11.2022 в пункте Воронеж (верхняя панель) и пункте Ростов-на-Дону (нижняя панель) во время нагрева (14:41 UT, слева) и в паузе работы стэнда (14:51 UT, справа)

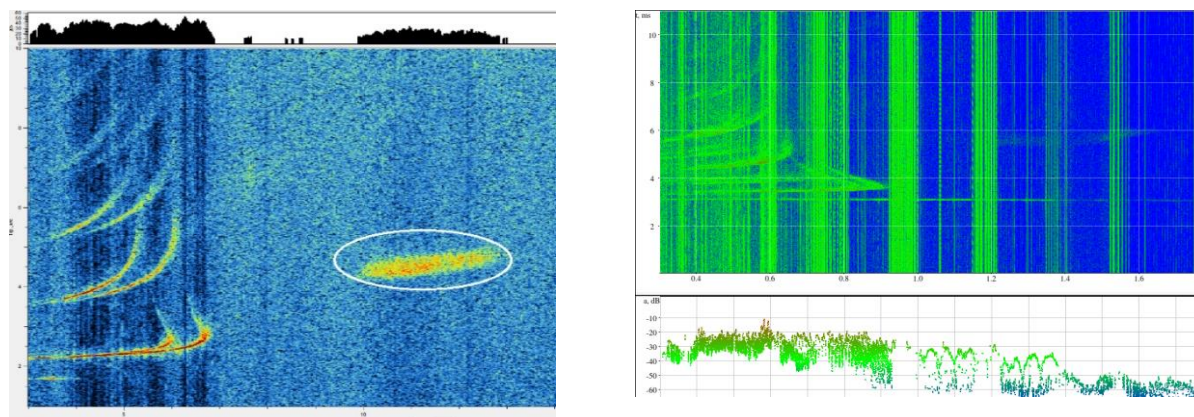


Рис. 3. Энергетические характеристики ракурсного рассеяния (backward волна) 18.11.2022 в пункте Воронеж (левая панель) и пункте Ростов-на-Дону (правая панель) во время нагрева (14:41 UT)

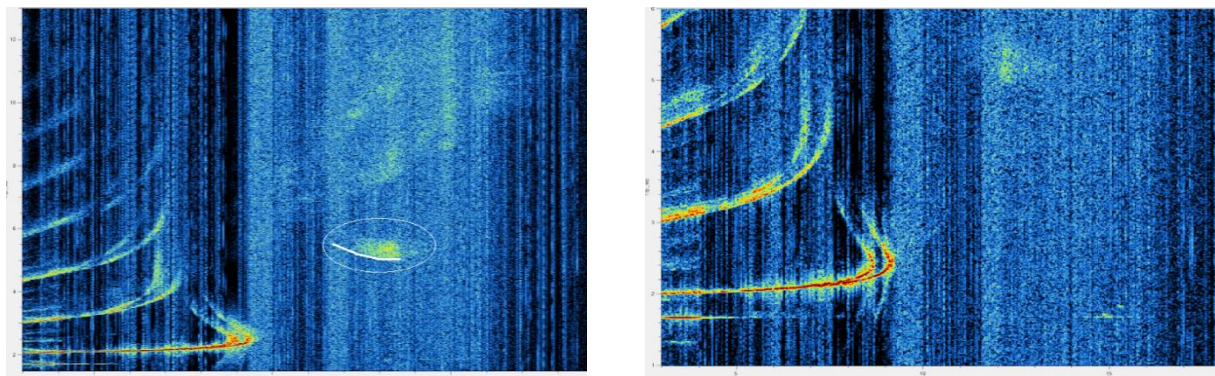


Рис. 4. Регистрация ракурсного рассеяния (forward волна) 29.09.2022 в пункте Приозерск во время нагрева (16:01 UT, слева) и в паузе работы стенда (14:26 UT, справа)

### Заключение

Результаты экспериментальных исследований пространственных свойств сигнала ракурсного рассеяния на магнитоориентированных мелкомасштабных неоднородностях, индуцированных нагревным стендом «Сура» с излучением из пункта Москва (ИЗМИРАН) и приемом на сети пунктов в ближней и дальней зонах нагревного стенда «Сура», следующие:

- а) показаны сильная пространственная анизотропия, резонансный характер сигнала ракурсного рассеяния, существование устойчивых и слабоустойчивых зон приема;
- б) обнаружен эффект рефракции в крупномасштабной области возмущения электронной плотности, определяемой диаграммой направленности антенны стенда «Сура»;
- в) ракурсный сигнал формируется физически полностью рассеянным волновым полем.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00385).

### Список литературы

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145-1177.
2. Andronov I.V., Bouche D. Forward and backward waves in high frequency diffraction by an elongated spheroid // Progress in Electromagnetics Research B. 2011. Vol. 29. P. 209–231.
3. Andronov I., Mitra R. Recent Advances in the Asymptotic Theory of Diffraction by Elongated Bodies // Progress in Electromagnetics Research. 2015. Vol. 150. P. 163-182. DOI:10.2528/PIER15011405
4. Кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности по данным радарных измерений с помощью ионозонда-радиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова, В.П. Урядов и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1-2. С. 1-13.