

**ДИНАМИКА ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВО ВРЕМЯ
МАГНИТНЫХ БУРЬ В АВГУСТЕ-СЕНТЯБРЕ 2024 ГОДА В ТОМ ЧИСЛЕ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ СТЕНДОМ СУРА ПО ДАННЫМ
СЕТИ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НИРФИ ННГУ**

**К.К. Грехнева, С.М. Леконцев, А.В. Шиндин, Н.С. Тимукин, Е.В. Тареева,
С.П. Моисеев**

*Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Лобачевского,
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а
E-mail: grekhneva@rf.unn.ru*

Аннотация. В статье приводятся результаты мониторинга динамики ионосферных неоднородностей во время магнитных бурь в августе-сентябре 2024 года в том числе при воздействии на ионосферу стендом СУРА с использованием созданной в НИРФИ ННГУ сети геофизического мониторинга. Сеть геофизического мониторинга НИРФИ ННГУ представляет собой набор разнесенных в пространстве приёмных пунктов, связанных информационной сетью и оснащенных геофизическими приборами разработки НИРФИ.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные неоднородности, магнитная буря, сеть геофизического мониторинга, вертикальное зондирование ионосферы

**DYNAMICS OF IONOSPHERIC IRREGULARITIES DURING
THE MAGNETIC STORMS IN AUGUST-SEPTEMBER 2024 INCLUDING
WITH THE IMPACT ON THE IONOSPHERE BY THE SURA FACILITY
ACCORDING TO THE DATA OF THE GEOPHYSICAL MONITORING NETWORK
OF THE RESEARCH INSTITUTE OF RADIOPHYSICS**

K.K. Grekhneva, S.M. Lekontsev, A.V. Shindin, N. S. Timukin, E.V. Tareeva, S.P. Moiseev

Abstract. The article presents the results of the dynamics of ionospheric irregularities during the magnetic storms in August-September 2024 including with the impact the SURA facility on the ionosphere using the geophysical network created at the UNN Radiophysical Research Institute (RRI). The geophysical monitoring network of the UNN RRI is a set of spatially distributed receiving points connected by an information network and equipped with geophysical instruments of the RRI's own design.

Keywords: ionosphere, ionospheric irregularities, magnetic storm, geophysical monitoring network, vertical sounding of the ionosphere

Введение

Исследования эффектов, возникающих в ионосфере Земли при воздействии на неё мощным КВ-радиоизлучением направлены на изучение поведения волн и частиц в околосемной плазме, а также динамики ионосферных неоднородностей. Исследования проводятся на нагревных стенах в ходе активных экспериментов. Диагностика ионосферных возмущений естественного (обусловленных, например, магнитными бурями) и искусственного происхождения (вызванных, например, воздействием на ионосферу стендом СУРА) непосредственно связана с разработкой и эксплуатацией современных систем радиосвязи в КВ, УКВ и СВЧ диапазонах, радиолокации и радионавигации.

В августе-сентябре 2024 года эксперименты на стенде СУРА по многоточечной регистрации искусственного оптического свечения [1] сопровождались несколькими магнитными бурями класса G1-G4. В экспериментах были задействованы ионозонды распределенной сети геофизического мониторинга НИРФИ ННГУ [2].

Целью работы является исследование динамики ионосферных неоднородностей по данным ионозондов ION-FAST [3] и CADI во время магнитных бурь в августе-сентябре 2024 года и при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА. В задачи исследования входят: многоточечный приём и сбор данных с нескольких приемных пунктов; анализ полученных в ходе экспериментов ионограмм, а также профилей электронной концентрации.

Методика экспериментов

В экспериментах связанных с воздействием на ионосферу мощным КВ радиоизлучением необходима оперативная диагностика ионосферных неоднородностей. Для решения этой задачи разработанные макеты ионозондов ION-FAST были введены в опытную эксплуатацию на шести полигонах НИРФИ ННГУ, образуя сеть геофизического мониторинга ионосферы. В число приёмных пунктов сети входят: пункт на полигоне «Васильсурск»; полигоне «Зименки» и обсерватории «Старая Пустынь»; пункт на полигоне Казанского Приволжского Федерального университета вблизи д. Ореховка (Республика Татарстан); полигоне ННГУ «Карадаг» (Республика Крым) и полигоне ННГУ «Видлица» (Республика Карелия).

Эксперименты по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением во время магнитной бури проходили в августе и сентябре 2024 года. Динамику ионосферных неоднородностей в условиях магнитной бури удалось наблюдать на ионограммах, полученных 1-го, 4-го и 12-го августа 2024 года с помощью макета ионозонда ION-FAST и ионозонда CADI. Оба ионозонда регистрировали данные на территории полигона «Васильсурск», CADI с 6-минутным интервалом, а ION-FAST с секундным.

3-4 августа 2024 года с помощью нагревного стенда СУРА проводился эксперимент по воздействию на ионосферу мощным КВ-излучением. Регистрация ионограмм с помощью ионозонда ION-FAST проводилась в 3 пунктах сети геофизического мониторинга. С 19:00 до 21:45 (UTC) частота работы стенда составляла 5828 кГц. Режим работы стенда включал в себя импульсы квазинепрерывного нагрева длительностью 150 с, с периодом 360 с.

Результаты

На рис.1 представлены ионограммы, зарегистрированные 1 августа 2024 года на стенде СУРА ионозондом CADI во время магнитной бури класса G1, которая проявилась в резком падении критической частоты f_0F2 , появлении на ионограммах перемещающихся рассеянных отражений (чёрные эллипсы), расслоении треков O- и X-мод (синие эллипсы), F-spread, а также в аномально интенсивном слое Es вечером 01.08.2024.

На рис.2 представлены ионограммы, полученные с помощью ионозондов ION-FAST и CADI 12 августа 2024 года в условиях магнитной бури класса G4. На ионограммах ионозонда ION-FAST наблюдается сильное расслоение следов отражения O- и X-волн; на ионограмме CADI следы отражения имеют вид Fspread без какой-либо детализации. Обработка ионограмм дает оценку для параметра $h_mF2 \sim 520$ км и затянутый по крайней мере до высоты 1000 км «хвост» профиля электронной концентрации.

Во время эксперимента по воздействию на ионосферу мощным КВ-излучением 3-го и 4-го августа 2024 года удалось заметить сходство динамики ионосферных неоднородностей с динамикой, возникающей во время магнитных бурь. А именно, наблюдались Fspread, расслоение отражающих следов и появление на ионограммах дополнительных отражающих областей на частотах воздействия, исчезающих в течение нескольких секунд после окончания воздействия.

На рис.3 изображены ионограммы, полученные ионозондом ION-FAST (интервал усреднения – 18 с) вблизи стенда СУРА. На панели *a* ионограмма, зарегистрированная за последние 18 с работы стенда СУРА (20:15:12-20:15:30 UTC) на частоте 5828 кГц; на панели *b* – ионограмма, зарегистрированная за первые 18 с после окончания воздействия (20:15:30-20:15:48 UTC); на панелях *c* и *d* – ионограммы, зарегистрированные за интервалы времени 20:16:00-20:16:18 UTC и 20:16:18-20:16:36 UTC соответственно. Видно, что сразу после выключения стенда, на ионограммах появляется дополнительное отражение, локализованное в области частот работы стенда СУРА на действующих частотах приблизительно на 25 км ниже действующей частоты отражения O-волны (синий эллипс).

В данном сеансе дополнительное отражение различимо только в течение первых 18 с после выключения стенда. Также можно выделить расслоение трека отражения X-волны (зеленый эллипс), которое наблюдается в приблизительно в течение минуты после выключения стенда. Подобные эффекты наблюдались в нескольких последовательных сеансах работы стенда 03.08.2024 г. В результате обработки ионограмм получены высоты отражения волны накачки для этой серии сеансов $\sim 350 \div 370$ км при высоте максимума слоя F2 ~ 400 км. При приближении частоты воздействия к f_0F2 на ионограммах ионозонда ION-FAST наблюдалось значительное расслоение следов отражения O- и X-волн. На ионограммах ионозонда CADI,

зарегистрированных в то же время наблюдался Fspread. Отмеченные «расслоение» и Fspread сохранялись до 10 минут после остановки работы стенда на данной частоте.

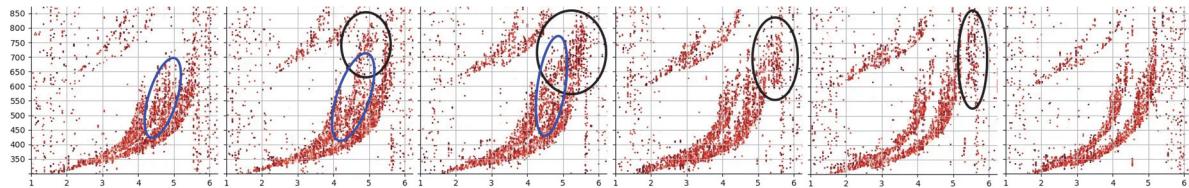


Рис. 1. Ионограммы, зарегистрированные ионозондом CADI 31.07.2024 в интервале 22:18-22:48 UTC с периодом 6 минут. Горизонтальная ось – частота в МГц, вертикальная ось – действующая высота в км

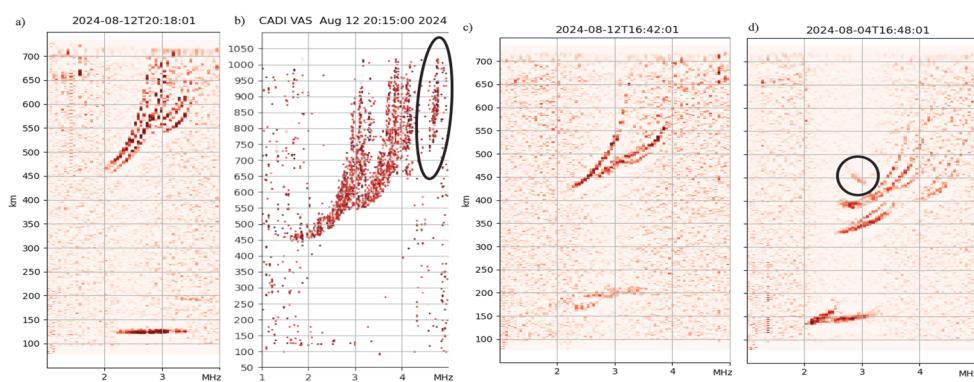


Рис. 2. Панели а, с, д – ионограммы ионозонда ION-FAST; панель б – ионограмма ионозонда CADI. Время регистрации ионограмм (UTC) указано над панелями. Черными эллипсами обозначены дополнительные рассеянные отражения

3 и 4 августа ионограммы регистрировались еще в двух пунктах сети: «Старая Пустынь» и Ореховка» (см. рис.4). Отмеченные выше эффекты в указанных пунктах не наблюдались, что может говорить о связи источника отраженного сигнала (синий эллипс на рис. 3) с возмущенной областью ионосферы, локализованной над стендом.

Сопоставляя между собой ионограммы, зарегистрированные в разных пунктах, можно заметить, что параметры f_0F2 , f_xF2 практически совпадают, что обусловлено одинаковой длиной квазивертикальных трасс распространения сигналов (170 км). При этом диапазоны частот наблюдения слоя Es отличаются (2,1÷4,2 МГц для пункта на стенде СУРА, 1,6÷3,7 МГц для пункта «Старая Пустынь» и 2,0÷3,1 МГц для пункта «Ореховка»), что также свидетельствует о направленности отраженного от слоя Es излучения.

Заключение

В ходе экспериментов по исследованию динамики ионосферных неоднородностей во время магнитных бурь и при воздействии на ионосферу стендом СУРА были получены и проанализированы ионограммы, зарегистрированные ионозондами ION-FAST и CADI. Во время магнитной бури класса G1 на ионограммах обнаружены перемещающиеся области отражения сигнала; во время бури класса G4 дополнительно выявлено значительное расслоение треков отражения О- и Х-волн. В ходе сеансов «нагрева» ионосферы на стенде СУРА, проведенных через 3 дня после бури класса G1, обнаружены похожие эффекты (дополнительные отражения и «расслоения»), обладающие ярко выраженной направленностью и частотной избирательностью.

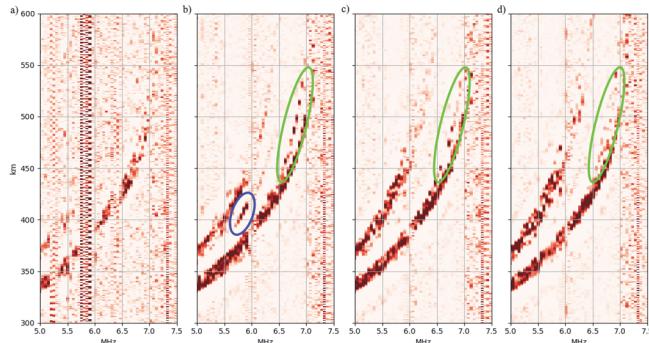


Рис. 3. Последовательные ионограммы, зарегистрированные ионозондом ION-FAST во время и сразу после сеанса работы стенда СУРА

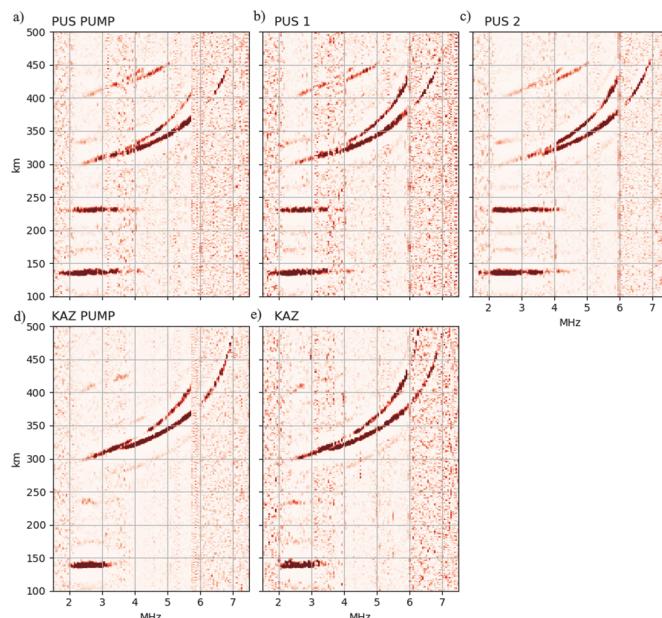


Рис. 4. Ионограммы, зарегистрированные ионозондом ION-FAST 3-го августа в пунктах «Старая Пустынь» (панели a, b, c; длина трассы – 170 км) и «Ореховка» (панели d, e; длина трассы – 173 км). Время регистрации соответствует таковой у панелей a, b, c рис. 3

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Грач С.М., Белецкий А.Б., Ткачев И.Д., и др. Воздействие радиоизлучением стенда СУРА на оптическое свечение ночной ионосферы. Обзор результатов 2021–2024 г.г. // Тезисы докл. Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 10–14 фев. 2025). – С. 159.
2. Грехнева К.К., Шиндин А.В., Моисеев С.П., Павлова В.А. Универсальная диагностическая платформа НИРФИ на базе современных микроэлектронных компонентов // Наноиндустрия. 2024. – Т. 17. – № 128. – С. 6.
3. Moiseev S.P., Shindin A.V., Grekhneva K.K., Pavlova V.A., Timukin N.S. ION-FAST as the NIRFI's Ionospheric Diagnostic Platform // Atmosphere. – 2024. – 15(2). – P. 16.