

УДК 550.388.2

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ СЕТИ ИОНОСФЕРНЫХ СТАНЦИЙ

Выборнов Федор Иванович¹, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики
e-mail: vybornov.fi@vsuwt.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Приводятся данные о диагностических возможностях среднеширотной сети ионосферных станций наклонного и вертикального зондирования ионосферы, их характеристиках и отдельных результатах, полученных в 2023-2025 годах при исследовании F-слоя ионосферы в условиях сильной гелио и геомагнитной возмущенности.

Ключевые слова: ионосфера, геомагнитные возмущения, ионозонд, ЛЧМ-зондирование, коротковолновая радиосвязь, поглощение, рассеяние радиоволн.

DIAGNOSTIC CAPABILITIES OF THE MID-LATITUDE NETWORK OF IONOSPHERIC STATIONS

Fedor I. Vybornov¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physics
e-mail: vybornov.fi@vsuwt.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents data on the diagnostic capabilities of the mid-latitude network of ionospheric stations for oblique and vertical sounding of the ionosphere, their characteristics and individual results obtained in 2023-2025 during the study of the F-layer of the ionosphere under conditions of strong helio- and geomagnetic disturbances.

Keywords: ionosphere, geomagnetic disturbances, ionosonde, chirp sounding, shortwave radio communication, absorption, scattering of radio waves.

Начиная с 20-х годов этого века на средних широтах России между г. Москвой и г. Казанью сформировалась диагностическая сеть ионосферных станций наклонного и вертикального зондирования ионосферы. Уникальной особенностью такой сети ионозондов является то, что она может работать синхронно, т.е. принимать зондирующий сигнал, излучаемый одной станцией, могут все остальные ионозонды. Такая возможность появилась потому, что все современные ионозонды стали синхронизовать свои часы сигналами GPS-спутников. Излучая сигнал в широком диапазоне частот в определенной

последовательности, ионозонды за несколько минут проводят детальные исследования параметров ионосферы Земли на огромной территории вдоль трассы зондирования при регулярных отражениях и на субавроральных трассах за счет отражений от крупномасштабных структур авроральной ионосферы.

Географическое расположение станций и параметры трасс зондирования

Регулярные экспериментальные исследования с использованием совместимых ионозондов разного типа проводятся многие годы, но только в последние 20-30 появилась возможность проводить регулярные исследования с использованием станций с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ).

Сеть таких станций располагается вдоль северного побережья нашей страны. Они работают по согласованному расписанию в интересах Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России. Эксплуатация ЛЧМ-станций осуществляется Федеральным государственным бюджетным учреждением «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ», г. Санкт-Петербург).

На средних широтах европейской части России располагаются несколько ЛЧМ-станций, которые принадлежат разным организациям (Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород; Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва; Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону; фирма SITCOM LLT, г. Йошкар-Ола). Здесь перечислены организации, которые занимаются активными исследованиями ионосферы с использованием ЛЧМ-станций зондирования. Реально таких станций в европейской части России значительно больше, но результаты их работы автору не известны. В дальнейшем речь пойдет только о ЛЧМ-ионозондах, расположенных на средних широтах России между г. Москвой и г. Казанью, где сформировалась диагностическая сеть ионосферных станций наклонного и вертикального зондирования ионосферы. Все они располагаются близко к 56° северной широты (удаление не более $0,5^\circ$). Это ЛЧМ-станции, которые располагаются в г. Нижний Новгород и п. Васильсурск, г. Казань и г. Москва.

На Рисунке 1 приведена схема части ионосферных трасс диагностики сигналами вышеперечисленных ЛЧМ-станций (г. Москва из-за удаленности на рисунке не приводится, а подробные пояснения по используемым на схеме обозначениям см. в [1]).

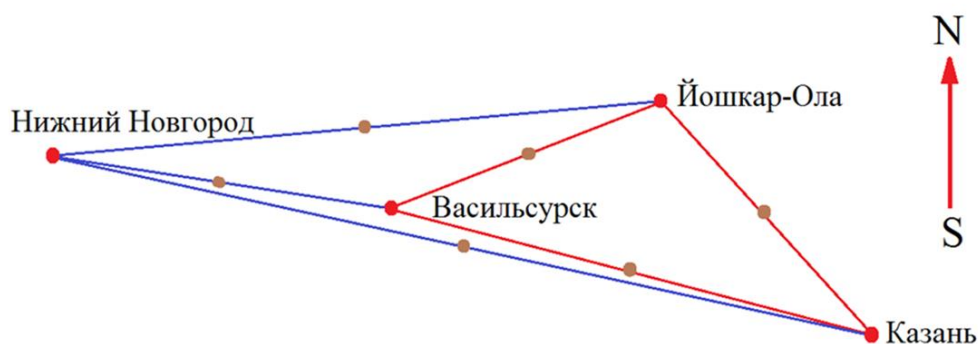


Рисунок 1 – Геометрия трасс восточной части сети ЛЧМ-станций

В Таблице 1 приведены координаты ЛЧМ-ионозондов. Ионозонды вертикального зондирования расположены в г. Москве, п. Васильсурск и г. Казани. В Таблице 2 приведены параметры трасс зондирования, азимут указан относительно начального пункта трассы. Дополнительно к работе сети привлекается ЛЧМ станция в г. Йошкар-Ола. Параметры ЛЧМ трасс зондирования приведены в Таблице 2.

Таблица 1. Координаты ЛЧМ станций

№	Расположение	Значение
1	Васильсурск	56.1° N; 46.0° E
2	Казань	55.8° N; 49.1° E
3	Москва	55.5° N; 37.3° E
4	Нижний Новгород	56.3° N; 44.0° E

Таблица 2. Параметры трасс зондирования

№	Трасса	Длина, км	Азимут, град.
1	Васильсурск – Казань	193	100.7
2	Васильсурск – Нижний Новгород	130	279.7
3	Васильсурск – Москва	555	266.2
4	Казань – Нижний Новгород	323	282.7
5	Казань – Москва	743	272.3

Ниже в качестве демонстрации комплексных регистрационных возможностей методов наклонного и вертикального радиозондирования ионосферы в задаче диагностики динамических крупномасштабных неоднородностей ионосферной плазмы при локализации измерительных средств в широтном направлении, приводятся результаты измерений, полученных в спокойных условиях и в условиях сильных гелио-геомагнитных возмущений.

Описание эксперимента

Интересные результаты были получены 12.09.2023 г. с 15:00 мск до полуночи при работе сети ЛЧМ-станций. На Рисунке 2 приводятся дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) ионосферы, полученные на трассе Васильсурск – Нижний Новгород в условиях развития сильной ионосферной бури. Аналогичные ДЧХ наблюдались на трассах Москва – Нижний Новгород и Москва – Казань.

На Рисунке 3 приведена ионограмма ионозонда вертикального зондирования CADI в Васильсурске для этого интервала время. Все ДЧХ и ионограммы показывают, что в условиях сильного поглощения регулярных отражений наблюдаются сильно развитые диффузные отражения от аномально далеких областей ионосферы (наиболее вероятно, что от крупномасштабных неоднородностей авроральной ионосферы).

12 сентября 2023 г. наблюдалась главная фаза геомагнитной бури, которая вызвала на сети синхронно работающих станций интенсивные дополнительные сигналы, которые были сформированы сложными механизмами отражения от крупномасштабных неоднородностей авроральной ионосферы: поляризационного джета и полярной стенки главного ионосферного провала [2-4]. Сигнал, который ранее в условиях спокойной ионосферы наблюдался на ДЧХ и ионограммах исключительно в виде четких треков, теперь дополнен перемещающейся диффузной областью (выделен на рисунках овалом), параметры которой определяются геометрией трассы. Время появления такой области ДЧХ и динамика ее поведения позволяет методом моделирования определить ее местоположение и механизм формирования в ионосфере.

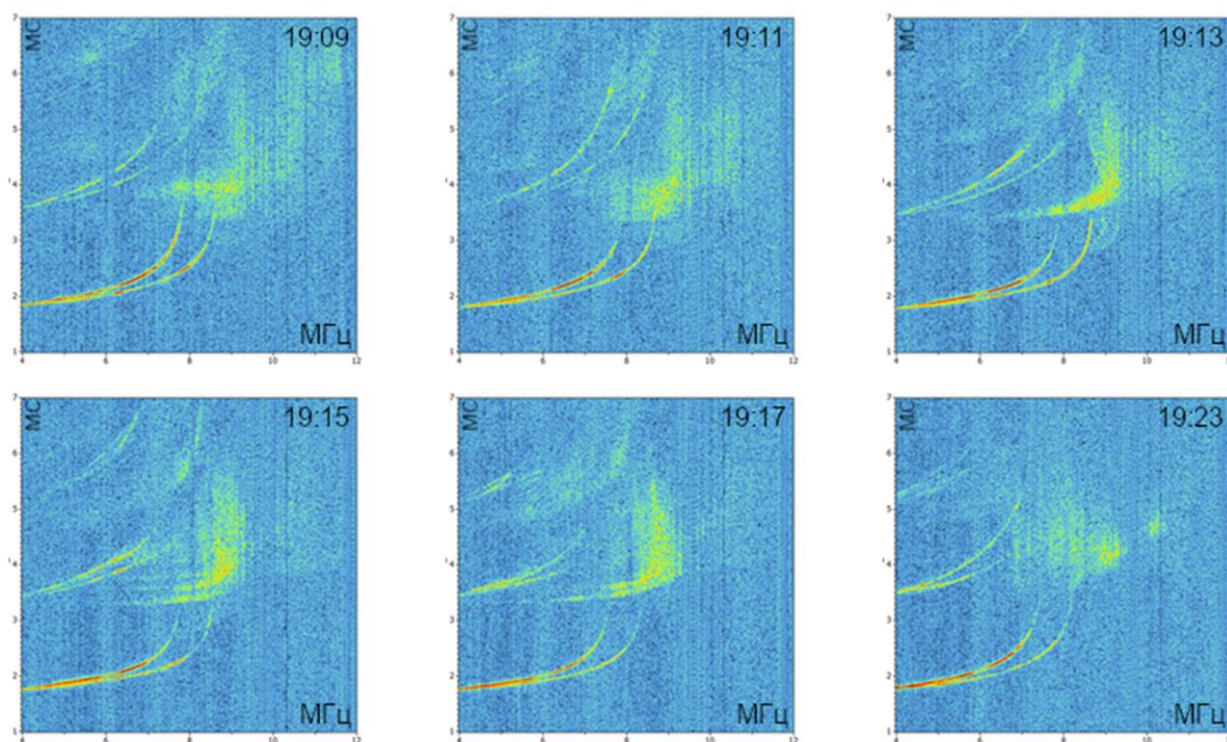


Рисунок 2 – Дистанционно-частотные характеристики ионосферы, полученные 12.09.2023г. на трассе Васильсурск – Нижний Новгород

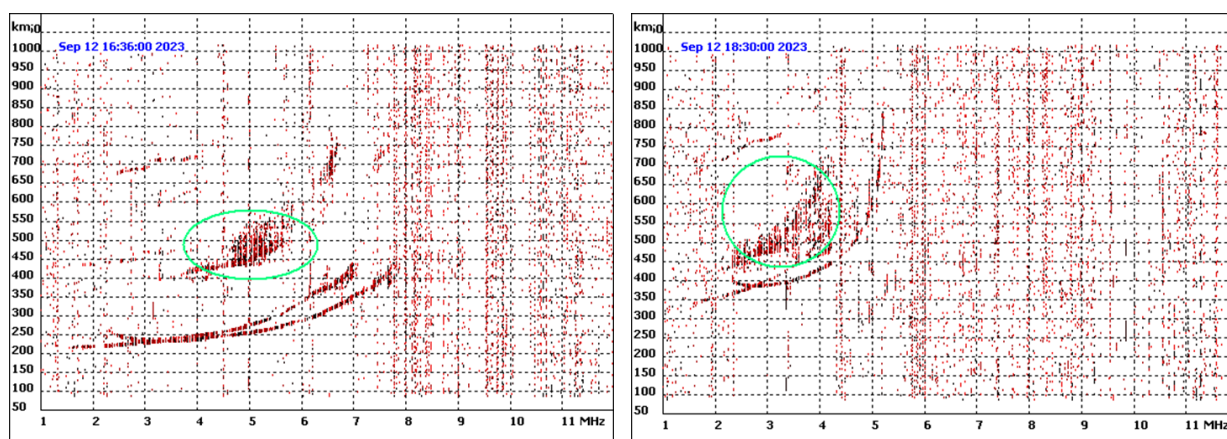


Рисунок 3 – Ионограммы ионозонда ВЗ Васильсурск (время на рисунках приведено в UT)

Для сравнения на Рисунке 4 приведена ионограмма ионозонда вертикального зондирования CADI в Васильсурске, полученная 31 января 2025 г. в относительно спокойных геофизических условиях, где наблюдаются только типичные ионосферные треки F-области ионосферы.

Заключение

Представлены результаты синхронных экспериментальных исследований среднеширотной ионосферы методами наклонного ЛЧМ и вертикального импульсного зондирования комплексом радиофизических средств диагностики. Показано, что во время главной фазы магнитной бури на сети синхронно работающих ЛЧМ-станций и ионозондов вертикального зондирования наблюдаются интенсивные дополнительные

области рассеяния, которые объясняются отражениями от крупномасштабных неоднородностей авроральной ионосферы.

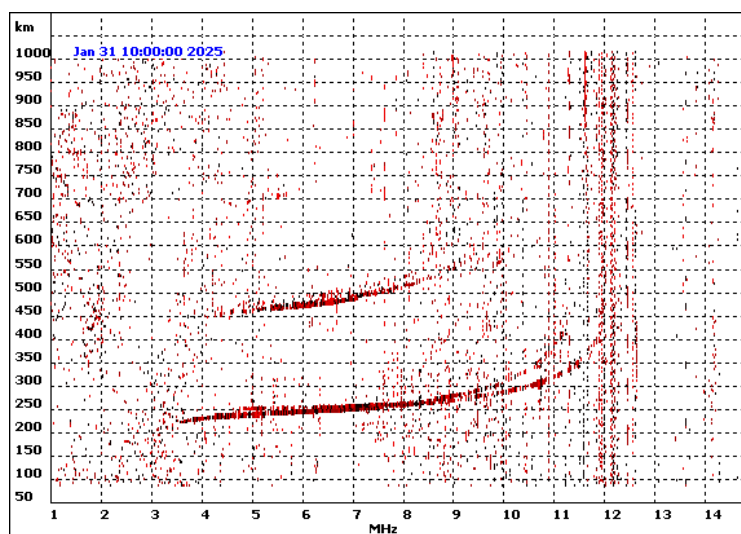


Рисунок 3 – Ионограмма ионозонда ВЗ, получена в Васильсурске 31 января в 10:00 UT

Список литературы:

1. F. I. Vybornov, E. Yu. Zykov, A. A. Kolchev, and I. V. Krasheninnikov. Ionospheric Manifestations of a Moderate Geomagnetic Storm on September 12, 2023, Based on Comprehensive Ionospheric Radiosonde Data. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – No. 5. – PP. 661-669.
2. Деминов М.Г., Шубин В.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58. – № 3. – С. 366-373.
3. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Известия вузов. Радиофизика. – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 10-15.
4. Синевич А. А., Чернышов А. А., Чугунин Д. В. и др. Геомагнетизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 6. – С. 764-774.