

УДК: 550.388.22

DOI: 10.26907/rwp29.2025.225-228

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДНЕШИРОТНАЯ ДОЛГОТНАЯ СЕТЬ ЛЧМ-СТАНЦИЙ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Ф.И. Выборнов^{1,4}, И.В. Крашенинников², А.А. Колчев³, Е.Ю. Зыков³

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагагина, 23
E-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии
наук, г. Москва E-mail: krash@izmiran.ru

³ Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18
E-mail: AAKolchev@kpfu.ru; Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

⁴ Волжский государственный университет водного транспорта,
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
E-mail: vybornov.fi@vsuwt.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований ионосферы системой среднеширотных синхронно работающих станций наклонного и ионозондов вертикального зондирования, когда на фоне регулярных отражений от F-слоя ионосферы были обнаружены сильные диффузные отражения от динамических структур авроральной ионосферы.

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

EXPERIMENTAL MID-LATITUDE LONGITUDINAL NETWORK OF CHIRP STATIONS FOR IONOSPHERE SOUNDING IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

F.I. Vybornov, I.V. Krashenninikov, A.A. Kolchev, E.Yu. Zykov

Abstract. The results of ionospheric research by a system of mid-latitude synchronously operating stations of inclined and vertical sounding ionosondes are presented, when strong diffuse reflections from dynamic structures of the auroral ionosphere were detected against the background of regular reflections from the F-layer of the ionosphere.

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

Введение

Авроральная часть высокоширотной ионосферы характеризуется наличием крупномасштабных динамических структур: полярного овала, главного ионосферного провала (ГИП), авроральных D- и E-слоев, которые при ионосферных возмущениях, обусловленных магнитными бурями, могут смещаться в область средних широт и проявляться в данных радиозондирования ионосферы. Такие эффекты ионосферных возмущений наблюдались нами в ходе проведения измерений 12 сентября 2023 г. в условиях умеренной геомагнитной бури, когда для диагностики состояния ионосферы совместно использовались сеть ЛЧМ-станций наклонного зондирования (НЗ) и два ионозонда вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы.

Целью данной работы являются демонстрация комплексных регистрационных возможностей методов наклонного и вертикального радиозондирования ионосферы в задаче диагностики динамических крупномасштабных неоднородностей ионосферной плазмы при локализации измерительных средств в широтном направлении, описание эксперимента, гелиогеофизических условий, полученных результатов и их обсуждение.

Описание эксперимента и гелиогеофизических условий наблюдений

В эксперименте были задействованы экспериментальные средства Научно-исследовательского радиофизического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Казанского (Приволжского) федерального университета и ИЗМИРАН (Москва, Троицк). ЛЧМ-станции наклонного зондирования, расположенные в Троицке и Нижнем Новгороде работали только на прием, в Васильсурске и Казани попеременно – на прием и на передачу. Дополнительно работали ионозонды вертикального зондирования в Васильсурске (CADI с периодичностью в 6 минут) и в Троицке (Парус-А в стандартном пятнадцатиминутном режиме). Расположение ионозондов было близко к 56° северной широты (отклонение не более 0.5°).

Координаты станций ЛЧМ-зондирования приведены в таблице 1. Символами R и/или T отмечены установки, соответственно работающие на прием и/или передачу. В таблице 2 приведены геометрические данные трасс НЗ ионосферы.

Таблица 1. Координаты ЛЧМ и ВЗ станций

№	Название станции	Координаты, град.
1	Васильсурск (R, T)	56.1° N; 46.0° E
2	Казань (R, T)	55.8° N; 49.1° E
3	Нижний Новгород (R)	56.3° N; 44.0° E
4	Троицк (R)	55.5° N; 37.3° 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 – Троицк	555	266.2
4.	Казань – Нижний Новгород	323	282.7
5.	Казань – Троицк	743	272.3

12 сентября 2023 г. ЛЧМ-станции работали на передачу с 15:00 мск, скорость перестройки частоты составляла 110 кГц/с в диапазоне от 4 МГц до 12 МГц.

Магнитная буря умеренной интенсивности началась 12 сентября 2023 года с увеличения магнитного индекса Dst в 00:00 UT, начальная фаза продолжалась до 12:00 UT 12.09.2023, а затем с резкого уменьшения индекса Dst началась главная фаза бури, которая продолжилась до 23:00 UT, когда было достигнуто значение –85 нТл. Затем началась фаза восстановления [1, 2].

Индекс геомагнитной возмущенности Kp в начале суток 12 сентября 2023 г. находился на уровне 0-1, а после 9:00 UT начал увеличиваться, достигнув с 12:00 UT до 18:00 UT уровня 5+.

Результаты наблюдений

ЛЧМ-станции НЗ начали работу по согласованной программе с 16:00 мск. На трассе Васильсурск – Нижний Новгород дополнительные треки на ионограммах НЗ в виде слабых рассеянных отражений появились в 18:55 мск с временами задержек 6-8 мс, когда максимальная применимая частота (МПЧ) 1F ионосферы (определялась везде по обыкновенной компоненте) составляла 7.5 МГц и хорошо регистрировались следы мод 2F-4F. Диффузное отражение в диапазоне частот 7-9 МГц в виде двойного облака регистрировалось с задержками 6-6.5 и 7-7.5 мс (рис.1). Далее задержки уменьшились до 5-6 мс и 6.2-8 мс с диапазоном частот 6.8 – 11 МГц. Рассеяние наблюдалось до 19:29 мск.

Поведение ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Казань в целом напоминало динамику поведения ДЧХ на трассе Васильсурск – Нижний Новгород. Появление рассеянной области отмечается с 18:59 мск в диапазоне 7.5 – 10 МГц и диапазоном задержек 5- 7.5 мс.

Поведение ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Троицк имело ряд особенностей. Большие, чем на остальных трассах значения МПЧ (от 8.5 МГц в 18:55 с увеличением до 9.3 МГц в 19:11 мск с последующим уменьшением в 19:29 МСК). Область рассеяния появилась в 18:59 мск с задержками большими 7 мс в диапазоне частот 9.5–10.5 МГц. Уже в 19:05 мск

сформировался диффузный слой, характерный для наклонного отражения с диапазоном задержек 4.5–6.5 мс в диапазоне частот 7–11 МГц.

На трассах Казань – Нижний Новгород и Казань – Троицк принимались интенсивные сигналы регулярных отражений (1F – 4F), но рассеянные сигналы принимались слабее, чем при работе ЛЧМ-передатчика из п. Васильсурск. На трассе Казань – Нижний Новгород две диффузные области появились в 19:04 мск на частотах 7–9 и 10.5–11.5 МГц с диапазонами задержек 4–5 и 4.5–6.5 мс. В 19:24 мск слабо наблюдались две области рассеяния на частотах 7.5–8 и 10.5–11.5 МГц с диапазонами задержек 3.5–5 и 4.5–5.5 мс, а с 19:30 мск рассеяние не регистрировалось. На трассе Казань – Троицк область рассеяния появилась в 19:06 мск на частотах 10.5–11.5 МГц с диапазоном задержек 5–7 мс, а затем в 19:08 мск приобрела диффузную наклонную форму регулярного отражения с наименьшей частотой 8 и наибольшей частотой 12 МГц с диапазоном задержек 4.5–6 мс.

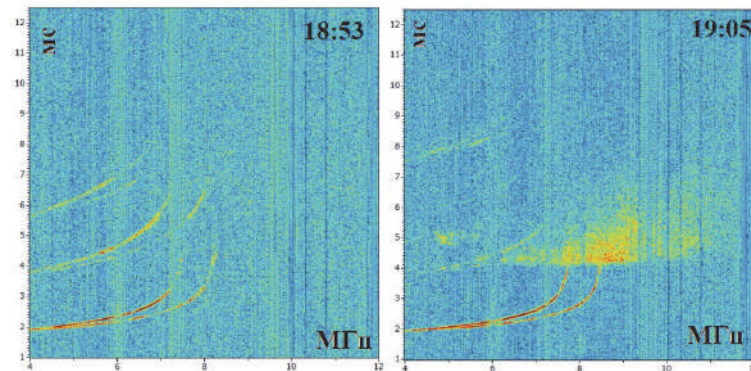


Рис.1

Ионозонд CADI в п. Васильсурск обнаружил область рассеяния в 19:36 мск. Область рассеяния наблюдалась в диапазоне частот 3.5–6.5 МГц и действующими высотами 400–750 км. Вместе с уменьшением критической частоты до 5 МГц в 20:00 мск менялись параметры области рассеяния (см. рис. 2).

Ионозонд Парус-А (Троицк) обнаружил область рассеяния в 17:30 UT. Кульминация развития области наблюдалась в 18:15 UT (рис 2).

Обсуждение результатов и выводы

В области авроральной ионосферы нами рассматривались три крупномасштабные структуры, которые могут проявляться в данных радиозондирования механизмом рефракционного отражения (геометрической оптики): полярная стенка ГИП, поляризационный джет (SAID – SubAuroral Ion Drifts) и авроральный E-слой. На время 12.09.2023 г. 17:30, 18:15 и 19:15 UT полярный овал и полярная стенка ГИП находятся на широте Санкт-Петербурга с некоторой динамикой к югу (расчет выполнен по методике [3]), что составляет удаленность от ионозонда ИЗМИРАН ~ 500 км (5° по меридиану). Оценки удаленности от ионозонда возможной крупномасштабной структуры авроральной ионосферы, дающей дополнительный диффузный след между следами 1F2 и 2F2 на ионограмме ВЗ (рис. 2), дают значение только ~ 250–300 км, что явно недостаточно для объяснения такого отражения полярной стенкой ГИП. Авроральный E-слой ионосферы также не может рассматриваться как источник отражения с высокой интенсивностью, в силу плавности его спада в меридиональном направлении, и в данном механизме практически отсутствовала бы частотная зависимость в формируемом им следе. Поэтому наиболее вероятным источником формирования дополнительного следа на этих ионограммах ВЗ станций ИЗМИРАН и Васильсурск можно рассматривать поляризационный джет [4–5] и сопутствующие процессы в виде SAR (Stable Auroral Red) дуг [6] – области с повышенной температурой плазмы, локализованных южнее полярной стенки ГИП.

Заключение

Представлены результаты синхронных экспериментальных исследований среднеширотной и субавроральной ионосферы методами наклонного ЛЧМ и вертикального импульсного

зондирования комплексом радиофизических средств диагностики при их локализации в широтном направлении. Показано, что 12 сентября 2023 г. во время главной фазы магнитной бури на сети синхронно работающих станций наблюдались интенсивные дополнительные сигналы, которые были сформированы сложными механизмами отражения от крупномасштабных неоднородностей авроральной ионосферы: поляризационного джета и полярной стенки главного ионосферного провала.

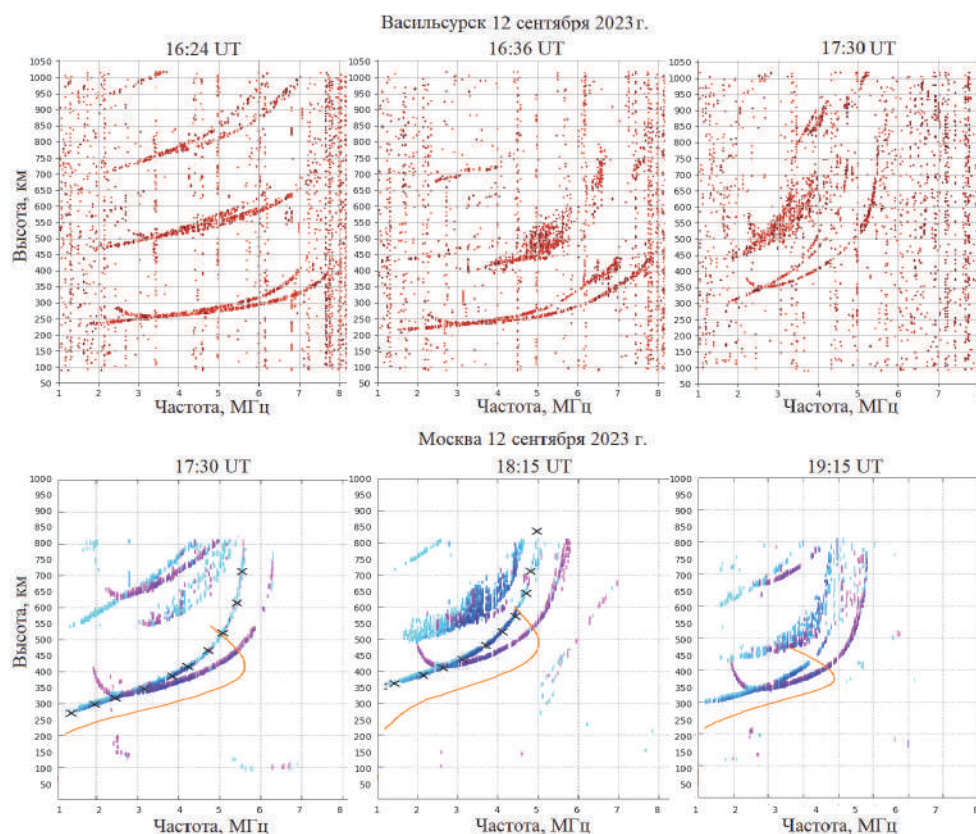


Рис. 2

Благодарности

Авторы благодарят гнс Деминова М.Г. (ИЗМИРАН) за обсуждение результатов, снс Падохина А.М. и внс Шубина В.Н. (ИЗМИРАН) за помощь в работе.

Работа Ф.И. Выборнова выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-72-20019).

Список литературы

1. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. – URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата обращения: 24.05.2024).
2. The Space Weather Prediction Center (SWPC). – URL: <https://www.swpc.noaa.gov/> (дата обращения: 24.05.2024).
3. Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58. – № 3. – С. 366–373.
4. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Развитие поляризационного джета и дрейфы плазмы в области F ионосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 10–15.
5. Синевич А. А., Чернышов А. А., Чугунин Д. В. и др. Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. – Т. 63. – № 6. – С. 764–774.
6. Rees, M.H. and Roble, R.G. Observations and theory of the formation of stable auroral red arcs // Reviews of Geophysics. – 1975. – Vol.3(1). – P. 201–245.

УДК: 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.229-232

МАГНИТНАЯ БУРЯ 10-19 МАЯ 2024 Г. И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА АТМОСФЕРУ, ИОНОСФЕРУ, РАДИОСВЯЗЬ И НАВИГАЦИЮ

Ю. В. Ясюкевич¹, Р. В. Васильев¹, А. В. Рубцов¹, Е.И. Данильчук^{1,2}, С.С. Алсаткин¹,
М.Ф. Артамонов¹, А.Б. Белецкий¹, А.Ю. Белинская³, О.И. Бернгардт¹,
А.М. Веснин¹, Д.А. Ганицкий¹, Я.И. Егоров¹, Г.А. Жеребцов¹, Н.А. Золотухина¹,
В.А. Иванова¹, В.А. Ивонин¹, Е.С. Исаева², А.Г. Ким¹, М.В. Кравцова¹,
В.И. Куркин¹, Д.С. Кушнарев¹, В.П. Лебедев¹, Р.А. Марчук¹, А.В. Медведев¹,
А.В. Михалев¹, А.В. Ойнац¹, С.В. Олемской¹, А.В. Подлесный¹, С.В. Подлесный¹,
С.Н. Пономарчук¹, К.Г. Ратовский¹, В.Е. Сдобнов¹, А.Г. Сетов¹, Т.Е. Сыренова¹,
В.П. Ташлыков¹, И.Д. Ткачёв¹, В.Г. Файнштейн¹, М.В. Цедрик¹, С.А. Язев^{1,2}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН г. Новосибирск, Россия

E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

Аннотация. Магнитная буря, произошедшая в мае 2024 г., стала уникальным событием, привлечшим внимание большого числа исследователей со всего мира. В настоящем докладе приведены результаты, полученные коллаборацией авторов из ИСЗФ СО РАН, ИГУ и ИНГТ СО РАН, об изменениях в состоянии атмосферы и ионосферы, а также ее воздействии на радиосвязь и характеристики функционирования глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: магнитная буря; атмосфера; ионосфера; май 2024; распространение радиоволн; глобальные навигационные спутниковые системы

10-19 MAY 2024 MAGNETIC STORM AND ITS EFFECTS ON THE ATMOSPHERE, IONOSPHERE, RADIO COMMUNICATIONS AND NAVIGATION

Yu.V. Yasyukevich, R.V. Vasiliev, A.V. Rubtsov, E.I. Danilchuk, S.S. Alsatkin, M.F. Artamonov,
A.B. Beletsky, A.Yu. Belinskaya, O.I. Berngardt, A.M. Vesnin, D.A. Ganitsky, Ya.I. Egorov,
G.A. Zherebtsov, N.A. Zolotukhina, V.A. Ivanova, V.A. Ivonin, E.S. Isaeva, A.G. Kim,
M.V. Kravtsova, V.I. Kurkin, D.S. Kushnarev, V.P. Lebedev, R.A. Marchuk, A.V. Medvedev,
A.V. Mikhalev, A.V. Oinats, S.V. Olemskoy, A.V. Podlesny, S.V. Podlesny, S.N. Ponomarchuk,
K.G. Ratovsky, V.E. Sdobnov, A.G. Setov, T.E. Syrenova, V.P. Tashlykov, I.D. Tkachev,
V.G. Fainshtein, M.V. Cedric, S.A. Yazev

Abstract. The May 2024 magnetic storm - a unique event - attracted a lot of worldwide attention. This report presents the collaborative results of ISTP SB RAS, ISU and IPGG SB RAS on changes in the state of the atmosphere and ionosphere, as well as its impact on radio communications and the characteristics of the transition to transient satellite systems.

Keywords: magnetic storm; atmosphere; May 2024; radio wave propagation; global navigation satellite system

Введение

Активность на Солнце является ключевым источником возмущений в околоземном космическом пространстве. Эти возмущения затрагивают функционирование технологических систем, включая спутниковые группировки, навигационные системы, системы транспорта, электроэнергетические и иные системы [1]. Магнитная буря в мае 2024 г. впервые за последние 20 лет вошла в ряд экстремальных бурь.

Активная область 13664 9 мая 2024 г. породила четыре вспышки X-класса подряд в течение суток, что является крайне редкой аномалией. Объединенный корональный выброс массы достиг магнитосферы Земли в 16:40 UT 10 мая и привёл к внезапному началу магнитной бури, характеризующемуся резким увеличением скорости солнечного ветра с 460 до 690 км/с и динамического давления до 60 нПа. Индекс Dst (рис. 1а) опустился до -422 нТл и достиг