"Physics of Auroral Phenomena", Proc. XLVII Annual Seminar, Apatity, pp. 40-44, 2024
© Polar Geophysical Institute, 2024

Polar Geophysical Institute

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.009

НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА УМЕРЕННОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 12 СЕНТЯБРЯ 2023 Г. ПО ДАННЫМ СРЕДНЕШИРОТНОЙ СЕТИ ЛЧМ-СТАНЦИЙ

Ф.И. Выборнов[1,4], Е.Ю. Зыков[2], А.А. Колчев[2], И.В. Крашенинников, А.М. Падохин[3]

[1]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия*

[2]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Россия*

[3]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, г. Москва, Россия*

[4]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация

Приводятся результаты исследований ионосферы 12 сентября 2023 г. системой среднеширотных синхронно работающих станций наклонного и ионозондов вертикального зондирования на главной фазе развития геомагнитной бури класса G1. На фоне регулярных отражений от F-слоя ионосферы были обнаружены сильные диффузные отражения от динамических структур авроральной ионосферы. Показано, что применение двух методов радиозондирования ионосферы позволило зарегистрировать отражения от различных крупномасштабных структур авроральной и субавроральной ионосферы: поляризационного джета и/или стабильных красных дуг (методом вертикального зондирования) и полярной стенки главного ионосферного провала (методом наклонного зондирования).

Введение

Базовыми средствами диагностики и мониторинга состояния ионизированной части атмосферы Земли являются станции вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) радиозондирования ионосферы. Условия отражения для зондирующих радиоволн от ионосферных неоднородностей в этих методах существенно различаются, что может дать в случае их совместного применения расширенные экспериментальные данные об особенностях эволюции крупномасштабных динамических структур ионосферы. Авроральная часть высокоширотной ионосферы характеризуется наличием крупномасштабных динамических неоднородностей: 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 и в комплексных данных измерений 12 сентября 2023 г. в условиях умеренной геомагнитной бури.

Ранее в работе [1] были представлены результаты проявления слабой ионосферной бури на трансавроральной радиотрассе меридиональной направленности Норильск-Иркутск в данных вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы. Целью данной работы является развитие регистрационных возможностей этих методов в задаче диагностики динамических крупномасштабных неоднородностей ионосферной плазмы при локализации измерительных средств в широтном направлении. Ниже приводится описание эксперимента, гелиогеофизических условий, полученных результатов и их обсуждение.

Описание эксперимента и условий наблюдений

В данном эксперименте были задействованы экспериментальные средства Научно-исследовательского радиофизического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Казанского (Приволжского) федерального

университета и ИЗМИРАН (Москва, Троицк). Геометрия трасс сети диагностики ионосферы (см. рис. 1) линейно-частотно-модулированными (ЛЧМ) сигналами и описание аппаратуры в основном повторяет приведенное ранее в [2]. ЛЧМ-станции НЗ, расположенные в Троицке и Нижнем Новгороде работали только на прием, в Васильсурске только на передачу, а в 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). Схема взаимного расположения ионозондов приведена на рис. 1. ЛЧМ-станции в Васильсурске, Казани и Нижнем Новгороде были однотипные (производства фирмы SITCOM LLT, Йошкар-Ола) с максимальной излучаемой мощностью 100 Вт.

12 сентября 2023 г. ЛЧМ–станции работали на передачу с 15:00 мск; излучение из Казани осуществлялось по четным минутам, а из Васильсурска – по нечетным. 13 сентября ЛЧМ станции работали на передачу с 17:30 мск циклами по 3 минуты (в нулевую минуту не излучали, в первую минуту включалась ЛЧМ станция Казани, во вторую - ЛЧМ станция Васильсурска, затем цикл повторялся). Скорость перестройки рабочей частоты составляла 110 кГц/с в диапазоне от 4 МГц до 12 МГц. На прием ЛЧМ-излучения станции в Нижнем Новгороде и Троицке работали ежеминутно, а в Казани и Васильсурске прием осуществлялся в интервалах циклов, где станции не излучали.

Магнитная буря класса G1 началась 12 сентября 2023 года с увеличения магнитного индекса D_{st} в 00:00 UT, начальная фаза продолжалась до 12:00 UT 12.09.2023, а затем с резкого уменьшения индекса D_{st} началась главная фаза бури, которая продолжилась до 23:00 UT, когда было достигнуто значение –85 нТл. Затем началась фаза восстановления [3, 4]. Индекс геомагнитной возмущенности Кр в начале суток 12 сентября 2023 года находился на уровне 0-1, а после 9:00 UT начал увеличиваться, достигнув с 12:00 UT до 18:00 UT уровня 5+. Далее индекс Кр начал снижаться. Геомагнитная буря сопровождалась оптическими явлениями – в ночь с 12 на 13 сентября 2023 г. на территории Нижегородской области (в том числе на полигоне НИРФИ – Васильсурск) регистрировались полярные сияния с ярко-выраженной зеленой компонентой.

Вспышечная солнечная активность за 10-12 сентября в целом оказалась низкой. Наиболее вероятной причиной геомагнитной бури, начавшейся 12 сентября, по-видимому, был корональный выброс массы 11 сентября в 22:35 UT, сопровождавшийся увеличением скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра (CP HSS – Coronal Hole High Speed Streams) от 340 до 450 км/с.

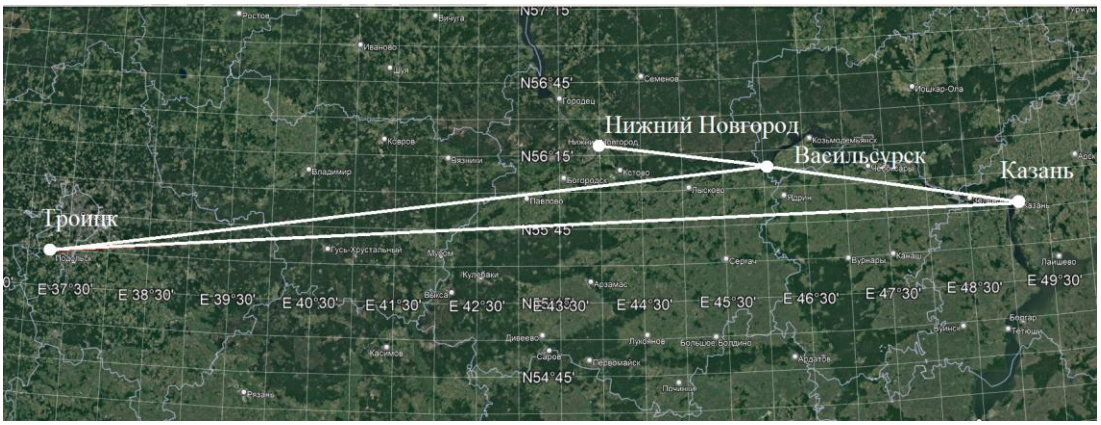

Рисунок 1. Схема взаимного расположения ионозондов.

Результаты наблюдений

Наклонное зондирование ионосферы

ЛЧМ-станции НЗ начали работу по согласованной программе 12 сентября 2023 года с 16:00 мск. На всех трассах зондирования уверенно регистрировались дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) F-слоя ионосферы до 19:00, типичных для невозмущенной среднеширотной ионосферы.

На трассе Васильсурск – Нижний Новгород (см. рис. 2) дополнительные треки на ионограммах НЗ – слабые рассеянные отражения 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.

В 18:59 мск задержки уменьшилась до 5-6 мс и 6.2-8 мс с диапазоном частот 6.8 – 11 МГц. Области рассеяния стали достаточно контрастными. В 19:01 мск задержки уменьшилась до 5-7.5 мс с диапазоном частот 7.5 – 11 МГц. Область рассеяния стала единой с контурами, похожими на форму трека 1F.

В 19:07 мск задержки уменьшилась до 3.5-6.5 мс. Началось формирование второго трека рассеяния с задержкой 4 мс и нижней частотой 8 МГц. МПЧ 1F увеличилась до 8 МГц. До 19:17 мск интенсивность (контрастность на ДЧХ) рассеянного сигнала увеличивается, МПЧ 1F остается близкой к 8 МГц. Далее до 19:29 мск интенсивность рассеянного сигнала ослабевает, МПЧ 1F уменьшается до 7.8 МГц.

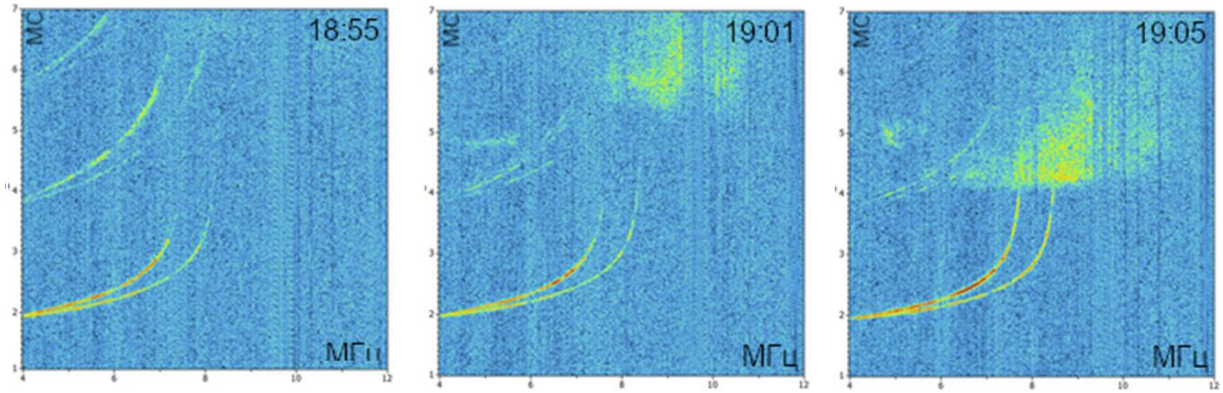

Рисунок 2. ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Нижний Новгород.

Поведение ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Казань в целом напоминает динамику поведения ДЧХ на трассе Васильсурск – Нижний Новгород. Появление рассеянной области отмечается с 18:59 мск в диапазоне 7.5 – 10 МГц с задержками 5- 7.5 мс. Значительно сильнее проявляется форма диффузного следа, характерного для наклонного отражения от сильно неоднородной области.

Поведение ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Троицк имела 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 до 8.5 МГц). Область рассеяния появилась в 18:59 мск с задержками большими 7 мс (вся ДЧХ ограничена 10 МГц) и 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 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. МНЧ в это время была около 8 МГц, в 19:14 мск увеличилась до 8.1 МГц, а к 19:24 мск уменьшилась до 7.5 МГц. С 19:30 мск рассеяние не регистрировалось.

На трассе Казань – Троицк в сеансе 19:02 мск МНЧ составляла 9.7 МГц. В 19:14 мск увеличилась до 10.3 МГц, а в 19:24 мск уменьшилась до 10.0 МГц. 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. К 19:24 мск область рассеяния слабо регистрируется на частотах 10.5 – 11.5 МГц с диапазоном задержек 4.5 – 5.5 мс и на следующих ДЧХ не наблюдается.

Вертикальное зондирование ионосферы

Ионограммы ионозонда CADI (п. Васильсурск Нижегородской области) приведены на рис. 3. Область рассеяния возникла в 19:36 мск (16:36 UT) на фоне регулярных отражений с критической частотой F-слоя ионосферы 7.8 МГц. Область рассеяния наблюдалась в диапазоне частот 3.5 – 6.5 МГц и с действующими высотами 400 – 750 км. Вместе с уменьшением критической частоты до 5 МГц в 20:00 мск менялись параметры области рассеяния (2.2 – 4.4 МГц, 420 – 700 км).

Ионозонд Парус-А (ИЗМИРАН) фиксировал развитие области рассеяния с отставанием на 40-50 минут от ионозонда CADI в п. Васильсурск (см. рис. 4).

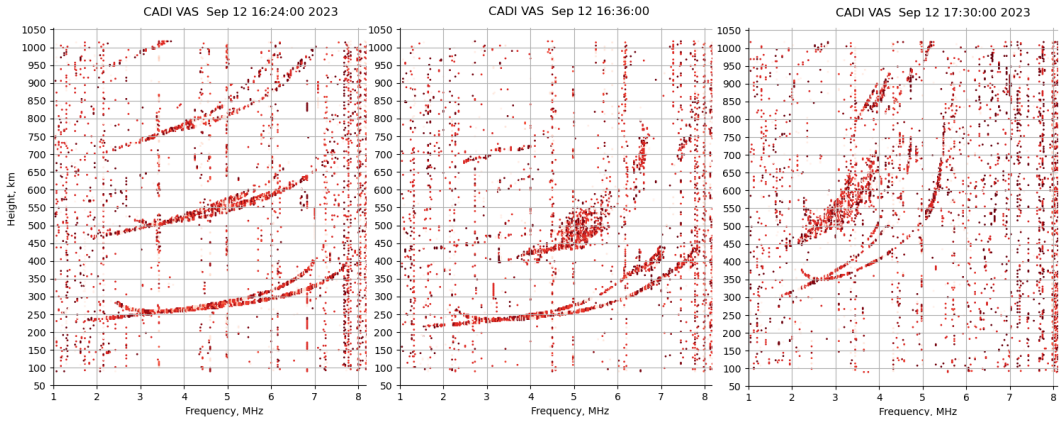

Рисунок 3. Ионограммы ионозонда CADI (п. Васильсурск Нижегородской области).

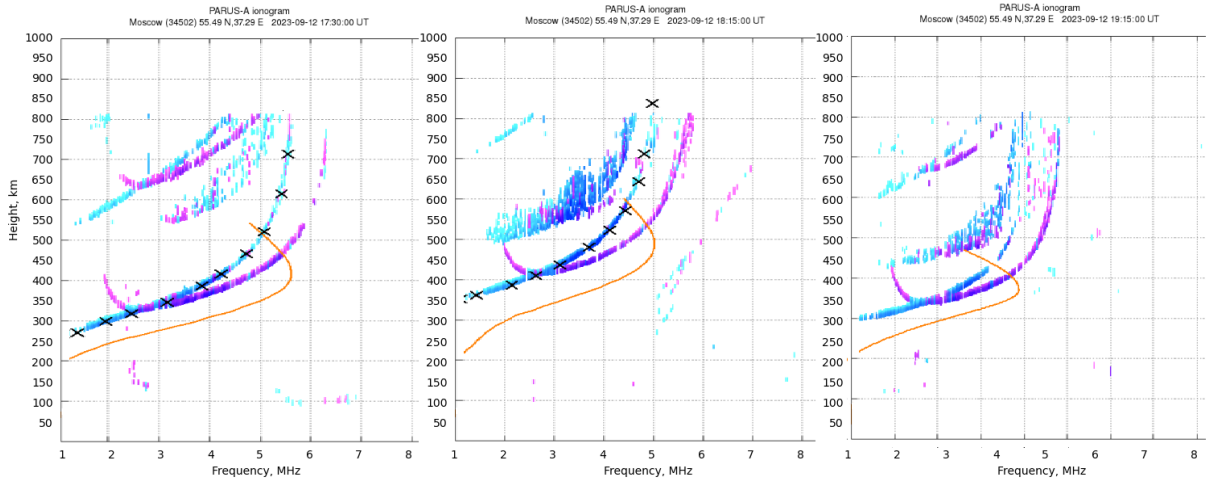

Рисунок 4. Ионограммы ионозонда Парус-А (ИЗМИРАН).

Обсуждение результатов и выводы

Известно [5], что эффекты геомагнитной активности проявляются сначала в высоких широтах в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия в условиях усиления солнечного ветра и высыпания заряженных частиц. В области авроральной ионосферы можно выделить три крупномасштабные структуры, которые могут проявляться в данных радиозондирования механизмом рефракционного отражения (геометрической оптики): полярная стенка ГИП, поляризационный джет (SAID – SubAuroral Ion Dridts) и авроральный E-слой. На время 12.09.2023 г. 17:30, 18:15 и 19:15 UT (ионограммы ВЗ приведены на рис. 3 и 4) полярный овал и полярная стенка ГИП находятся на широте Санкт-Петербурга с некоторой динамикой к югу (расчет выполнен по методике [6]), что составляет удаленность от ионозонда ИЗМИРАН ~ 500 км (5° по меридиану). Если оценить удаленность от ионозонда некоей крупномасштабной структуры авроральной ионосферы,дающей дополнительный диффузный след между следами 1F2 и 2F2 на ионограмме ВЗ (рис. 4), то с учетом измерений действующей высоты она составит на частоте 3 МГц только ~ 250–300 км, что недостаточно для объяснения такого отражения полярной стенкой ГИП. Поэтому наиболее вероятным источником формирования дополнительного следа на этих ионограммах ВЗ ст. ИЗМИРАН и Васильсурск можно рассматривать поляризационный джет [7] и сопутствующие процессы в виде SAR (Stable Auroral Red) дуг [8] – области с повышенной температурой плазмы, локализованных южнее полярной стенки ГИП. Также следует отметить и необычный характер следа – он находится внутри частотного диапазона базового следа, сформированного на экваториальной (фоновой) части ГИП. Такая особенность следа согласуется (по крайней мере, качественно) с относительно слабым понижением электронной плотности в поляризационном джете и SAR дугах и их относительно малым размером поперечного сечения (~ 100 км).

Для результатов наклонного радиозондирования в долготном направлении запаздывание сигналов дополнительных отражений существенно больше и составляет в среднем ~ 2 мс (600 км) (находятся на уровне следа второго кратного отражения от регулярного F-слоя). Также следует отметить весьма значительное превышение в максимальной наблюдаемой частоте – МНЧ, в среднем ~ 2 МГц, что вполне соответствует характеру отражения от полярной стенки ГИП, но противоречит результатам ВЗ (рис. 4). Таким образом, можно предположить, что в двух методах радиозондирования ионосферы были зарегистрированы отражения от различных крупномасштабных структур авроральной ионосферы: поляризационного джета или стабильных красных дуг (ВЗ) и полярной стенки ГИП (НЗ).

Заключение

Впервые представлены результаты 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 ЛЧМ-станций наблюдались интенсивные дополнительные сигналы, которые, предположительно, сформированы сложными механизмами отражения от крупномасштабных неоднородностей авроральной ионосферы: поляризационного джета и полярной стенки главного ионосферного провала.

Авторы благодарят гнс Деминова М.Г., Карпачева А.Т. (ИЗМИРАН) за обсуждение результатов, а внс Шубина В.Н. (ИЗМИРАН) за помощь в работе.

Список литературы

1. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 2. С. 245.
2. Vybornov F., Sheiner O., Kolchev A. et. al. // Atmosphere. 2022. V. 13. № 1. DOI: 10.3390/atmos13010084
3. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto: официальный сайт. URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ (дата обращения: 24.05.2024). Текст: электронный.
4. The Space Weather Prediction Center (SWPC): официальный сайт. URL: https://www.swpc.noaa.gov/ (дата обращения: 24.05.2024). Текст: электронный.
5. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 1980. 299 с.
6. Деминов М.Г., Шубин В.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 366.
7. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. // Известия вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 1. С. 10.
8. Rees M.H. and Roble R.G. // Reviews of Geophysics. 1975. V. 13(1). P. 201.