

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. Зыков², А.А. Колчев², И.В. Крашенинников³, А.М. Падохин³

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

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

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

⁴Федеральное 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 K_p 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 K_p 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.

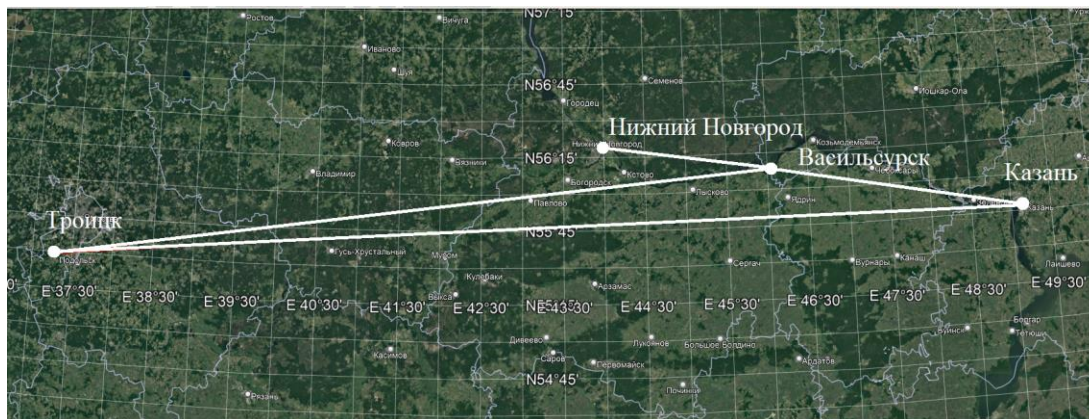


Рисунок 1. Схема взаимного расположения ионозондов.

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.

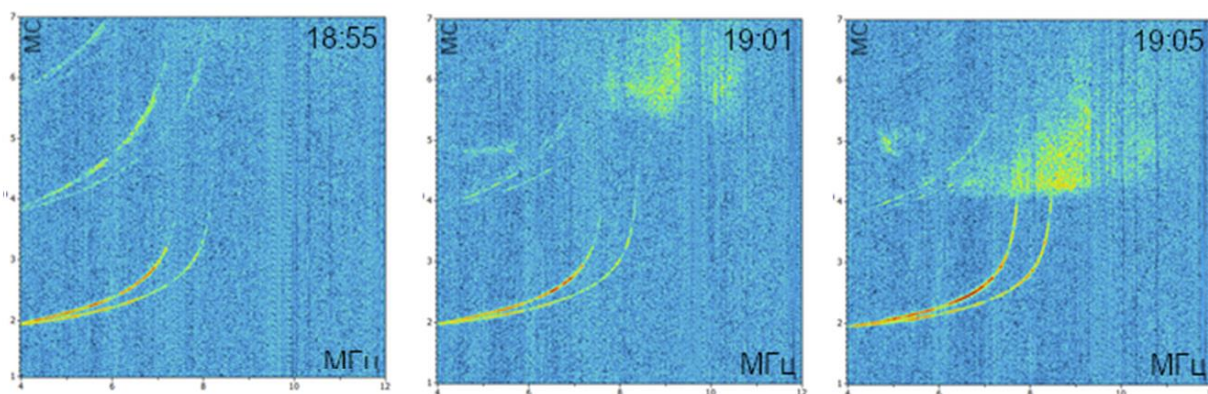


Рисунок 2. ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Нижний Новгород.

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).

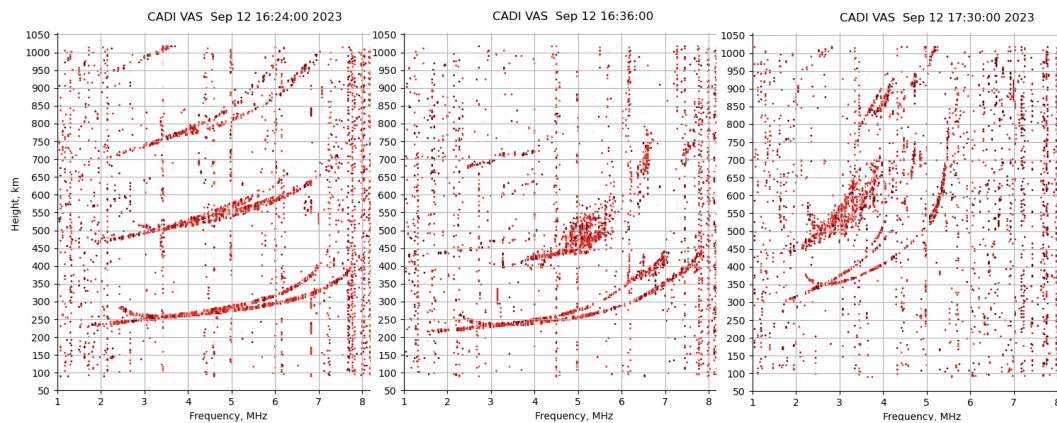


Рисунок 3. Ионограммы ионозонда CADI (п. Васильсурск Нижегородской области).

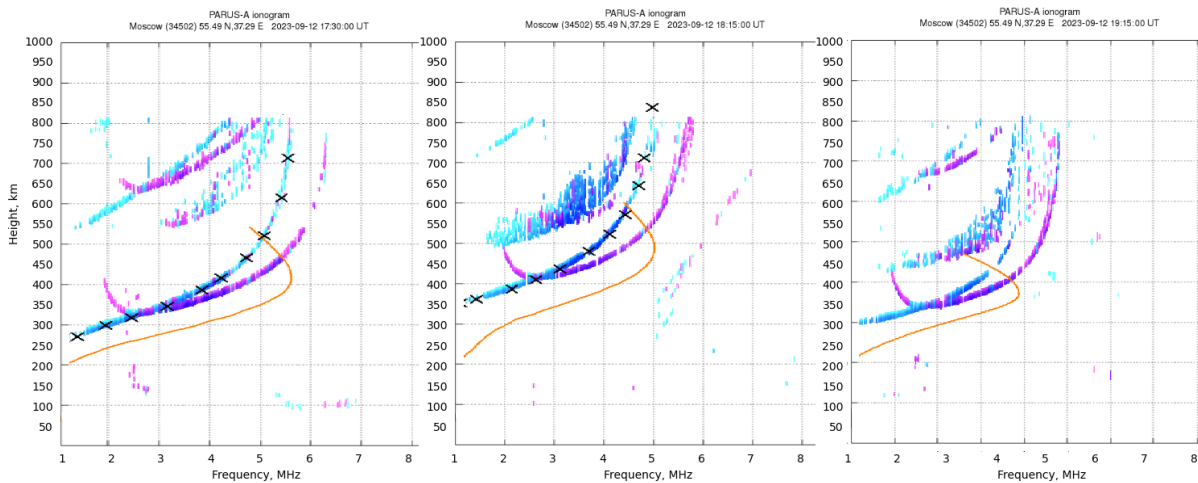


Рисунок 4. Ионограммы ионозонда Парус-А (ИЗМИРАН).

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. Vybormov 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.