

ИОНОСФЕРНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ УМЕРЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 12 СЕНТЯБРЯ 2023 г. ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

© 2025 г. Ф. И. Выборнов^{1,4,*}, Е. Ю. Зыков², А. А. Колчев², И. В. Крашенинников³

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

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

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук», Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», Нижний Новгород, Россия

*E-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 26.11.2024 г.

После доработки 23.12.2024 г.

Принята к публикации 31.01.2025 г.

Приводятся результаты исследований ионосферы 12 сентября 2023 г. системой среднеширотных синхронно работающих станций наклонного и ионозондов вертикального зондирования, когда 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.

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

DOI: 10.31857/S0367676525050034

ВВЕДЕНИЕ

Базовым средством диагностики и мониторинга состояния ионизированной части атмосферы Земли является вертикальное радиозондирование ионосферы (ВЗ) и результатом является регистрация ионограммы ВЗ – частотной зависимости группового запаздывания зондирующего сигнала от частоты. Существенно менее применимым методом является наклонное радиозондирование (НЗ), ввиду более высокой сложности формирования и интерпретации радиофизического отклика в виде ионограмм НЗ. Условия отражения для зондирующих радиоволн от ионосферных неоднородностей в методах вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы существенно различаются, что может дать в случае их совместного применения расширенные экспериментальные данные об особенностях эволюции крупномасштабных динамических структур ионосферы. В частности, таких как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [1] и неоднородности высокоширотной ионосферы. Авроральная часть высокоширотной ионосфе-

ры 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.

Ионосферные проявления геомагнитных возмущений существенно влияют на распространение коротких радиоволн через ионосферную плазму, вызывая: увеличенное поглощение, сокращение частотного диапазона прохождения вплоть до полной блокировки – блэкаута, рассеяние на неоднородностях электронной плотности (турбулентности) в области полярного овала, появление аномальных мод и отклонение направления прихода сигнала от дуги большого круга между передатчиком и приемником [2–7]. В частности, отмечается сильное влияние геомагнитных возмущений на эффективность работы радиотехнических систем (см., например, [8–10]), когда отрицательная фаза магнитной бури и силь-

ное поглощение в генерируемых заряженными частицами *E*- и *D*-слоях ионосферы охватывают значительные регионы, где могут проходить трассы коротковолновой радиосвязи и загоризонтной радиолокации. Эти эффекты ионосферного возмущения, в той или иной степени, наблюдались и в комплексных данных измерений 12 сентября 2023 г. в условиях умеренной геомагнитной бури.

Ранее в работе [11] были представлены результаты проявления слабой ионосферной бури на трансарктической радиотрассе меридиональной направленности Норильск–Иркутск в данных вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы. Целью данной работы является развитие 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 ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

В данном эксперименте были задействованы экспериментальные средства Научно-исследовательского радиопизического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Казанского (Приволжского) федерального университета и ИЗМИРАН (Москва, Троицк). Геометрия трасс сети диагностики ионосферы линейно-частотно-модулированными (ЛЧМ) сигналами и описание технологии и аппаратуры в основном повторяет приведенное ранее в [9]. 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 (САDI с периодичностью в 6 минут) и в Троицке («Парус-А» в стандартном пятнадцатиминутном режиме). Схема взаимного расположения ионозондов приведена на рис. 1а.

Координаты станций ЛЧМ-зондирования приведены в табл. 1. Символами *R* и/или *T* отмечены установки, соответственно работающие на прием и/или передачу. В табл. 2 приведены геометрические данные в конфигурации НЗ ионосферы: длины трасс радиозондирования и азимуты из пункта передачи на пункт приема.

ЛЧМ-станции в Васильсурске, Казани и Нижнем Новгороде были однотипные (производства фирмы SITCOM LLT, Йошкар-Ола) с максимальной излучаемой мощностью 100 Вт. Использовались разные антенны: в Васильсурске антенна «Дельта» была ориентирована на север; в Казани антенна «Наклонный луч» ориентирована на запад; в Нижнем Новгороде использовалась антенна вертикальная «Дельта», а в Троицке – вертикальный диполь (без азимутальной направленности).

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 до 12 МГц, что давало принципиальную возможность съема ионограмм НЗ в минутном режиме. На прием ЛЧМ-излучения станции в Ниж-

Таблица 1. Координаты ЛЧМ станций

№	Места расположений ЛЧМ станций	Координаты
1.	Васильсурск (<i>T</i>)	56.1° с.ш.; 46.0° в.д.
2.	Казань (<i>R, T</i>)	55.8° с.ш.; 49.1° в.д.
3.	Нижний Новгород (<i>R</i>)	56.3° с.ш.; 44.0° в.д.
4.	Троицк (<i>R</i>)	55.5° с.ш.; 37.3° в.д.

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

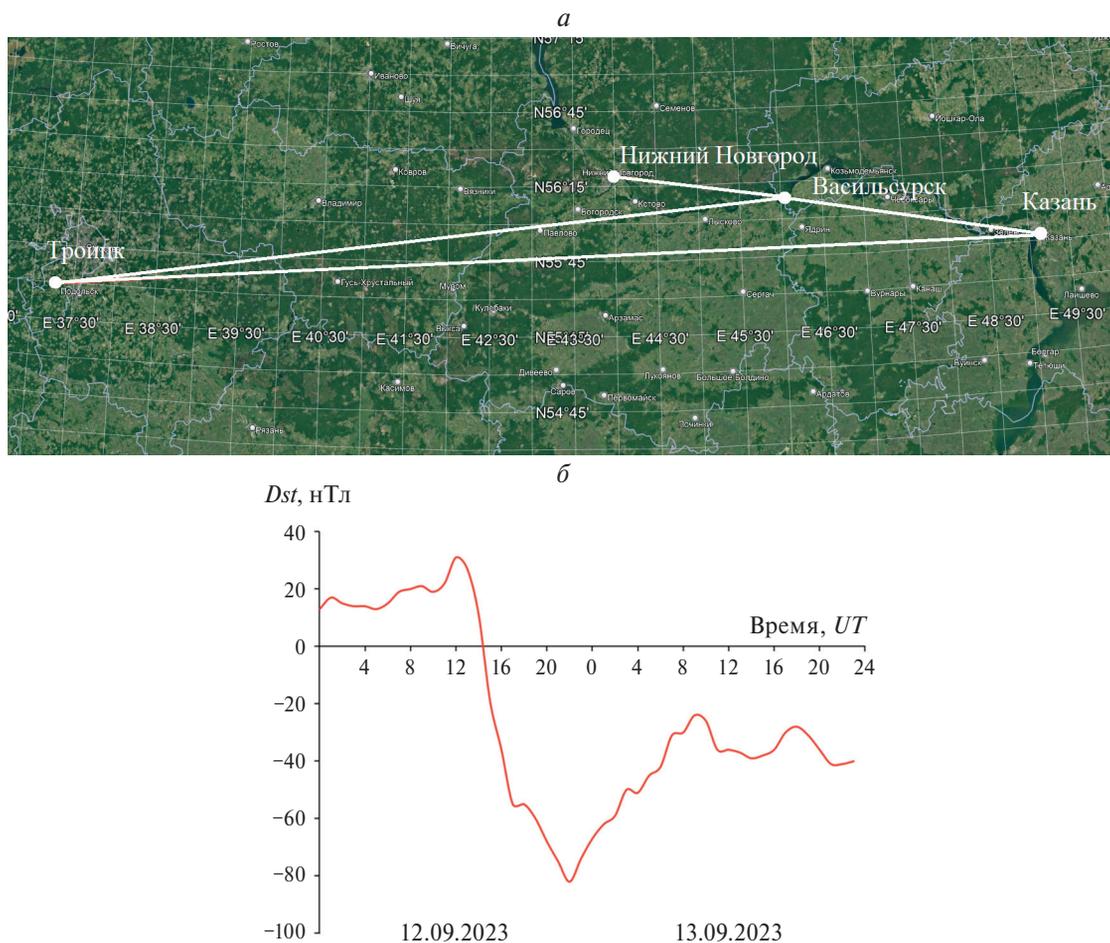


Рис. 1. Схема взаимного расположения ионозондов (а). Магнитный индекс Dst 12–13 сентября 2023 г. (б).

нем Новгороде и Троицке работали ежеминутно, а в Казани и Васильсурске прием осуществлялся в интервалах циклов, где станции не излучали.

На рис. 1б показана геофизическая обстановка 12 и 13 сентября 2023 г. по данным [12, 13]. Магнитная буря умеренной интенсивности началась 12 сентября 2023 г. 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.

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+. Далее индекс Kp начал снижаться [12, 13]. Наиболее чувствительным наземным индикатором интенсивности магнитных возмущений является авральный индекс AE , демонстрировавший сильные вариации 12 сентября: с 11:00 UT до 13:00 UT значения AE выросли до 800–1000 нТл, с 16:00 UT

менее чем за час увеличились до 1900 нТл и далее начали плавно уменьшаться [12].

К сожалению, не удалось провести анализ поведения B_z -компоненты межпланетного магнитного поля — данные спутника ACE оказались вне диапазона регистрации. 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 — 10 сентября наблюдались только вспышки типа C, и самой крупной была вспышка C8.3 из активной области AR3423 в 01:41 UT. В течение данного дня были зарегистрированы слабые корональные выбросы масс (CME — coronal mass ejection). В последующий день 11 сентября солнечная активность возросла до умеренного уровня благодаря трем вспышкам типа M. Вспышка M1.3 в AR3429 в 01:08 UT вызвала CME к востоку от Солнца (если смотреть с Земли),

который не оказал на ионосферу воздействия. 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.

12 сентября 2023 г. вспышечная активность была умеренная. За сутки произошли 3 вспышки типа M и 11 вспышек типа C. На коронографах LASCO C2 на борту космического корабля SOHO наблюдались три корональных выброса массы. По крайней мере, два из них в 19:12 UT и в 21:12 UT, судя по всему, были с обратной стороны Солнца, поэтому они не оказали влияния на Землю.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

ЛЧМ-станции НЗ начали работу по согласованной программе с 16:00 мск. На всех трассах зондирования уверенно регистрировались ДЧХ F-слоя ионосферы до 19:00, типичных для невозмущенной ионосферы (см. рис. 2а, 2в, 3а, 3г).

Прием сигналов ЛЧМ-передатчика из Васильсурска (рис. 2а–е)

На трассе Васильсурск – Нижний Новгород (см. рис. 2а,б) 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 уменьшились до 5–6 мс и 6.2–8 мс с диапазоном частот 6.8–11 МГц. Области рассеяния стали достаточно контрастными. Область рассеяния примыкала к треку 2F со стороны больших частот. МПЧ 1F ионосферы не менялась.

В 19:01 мск задержки уменьшились до 5–7.5 мс с диапазоном частот 7.5–11 МГц. Область рассеяния стала единой с контурами, похожими на форму трека 1F. В 19:05 мск задержки уменьшились до 4–6.5 мс с диапазоном частот 6–12 МГц. МПЧ 1F увеличилась до 7.8 МГц. В 19:07 мск задержки уменьшились 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. С 19:09 мск задержки уменьшились до 3–5 мс. 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.

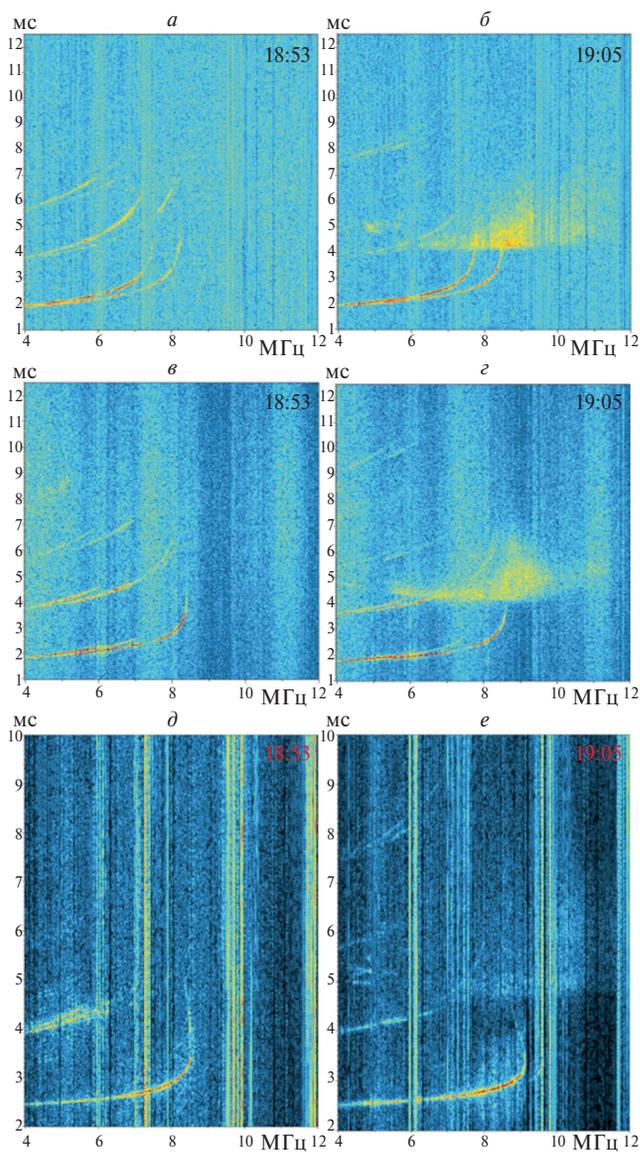


Рис. 2. ДЧХ ионосферы на трассах: Васильсурск–Казань (а, б); Васильсурск–Нижний Новгород (в, з); Васильсурск–Троицк (д, е) 12 сентября 2023 г. в 18:53 и 19:05 мск.

Поведение ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск–Казань (см. рис. 2в и 2г) 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 и диапазоном задержек 5–7.5 мс, МПЧ трека 1F 8.2 МГц. Значительно сильнее проявляется форма диффузного следа, характерного для наклонного отражения от сильно неоднородной области (с признаками верхних лучей). К 19:29 мск МПЧ 1F уменьшилась до 8 МГц, контрастность области рассеяния становится слабой.

С 19:07 мск выше основной области рассеяния на ДЧХ (ионограмме НЗ) появляется дополнительный плоский диффузный слой с задержками 4–5 мс и диапазоном частот от 4 до 9 МГц

(к 19:29 мск проявляется слабо до частот 6 МГц). Аналогичный слабый слой с близкими параметрами есть на ДЧХ трассы Васильсурск–Нижний Новгород. Заметим, что задержки этого трека на 1–1.5 мс больше нижних значений основной области рассеяния. Кроме того, с такими же временами задержек, но в диапазоне частот 9–11.5 МГц с 19:21 мск регистрируется дополнительный слабый диффузный трек.

Поведение ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск–Троицк (см. рис. 2*д,е*) имеет 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. В 19:09 мск область рассеяния разделилась на две: верхняя с задерж-

ками 4.8–7.5 мс в диапазоне 7–9 МГц и нижняя с задержками 4–5 мс в диапазоне частот 7–11 МГц. Максимальный диапазон частот нижней области рассеяния регистрировался в 19:11 МСК и составлял 8–12 МГц.

Далее области рассеяния становились менее контрастными, слабо проявлялись на ДЧХ. Верхняя область рассеяния имела интервал задержек 5–6.5 мс и диапазон частот 5–8 МГц, нижняя область 4–5 мс и 8.5–11 МГц соответственно.

*Прием сигналов ЛЧМ-передатчика из Казани (рис. 3*а–е*)*

Необходимо отметить, что на трассах Казань – Нижний Новгород (рис. 3*а–в*) и Казань–Троицк (рис. 3*г–е*) принимались интенсивные сигналы регулярных отражений ($1F-4F$), но из-за особенностей диаграммы направленности передающей антенны рассеянные сигналы принимались значительно слабее, чем при работе ЛЧМ-передатчика из п. Васильсурск.

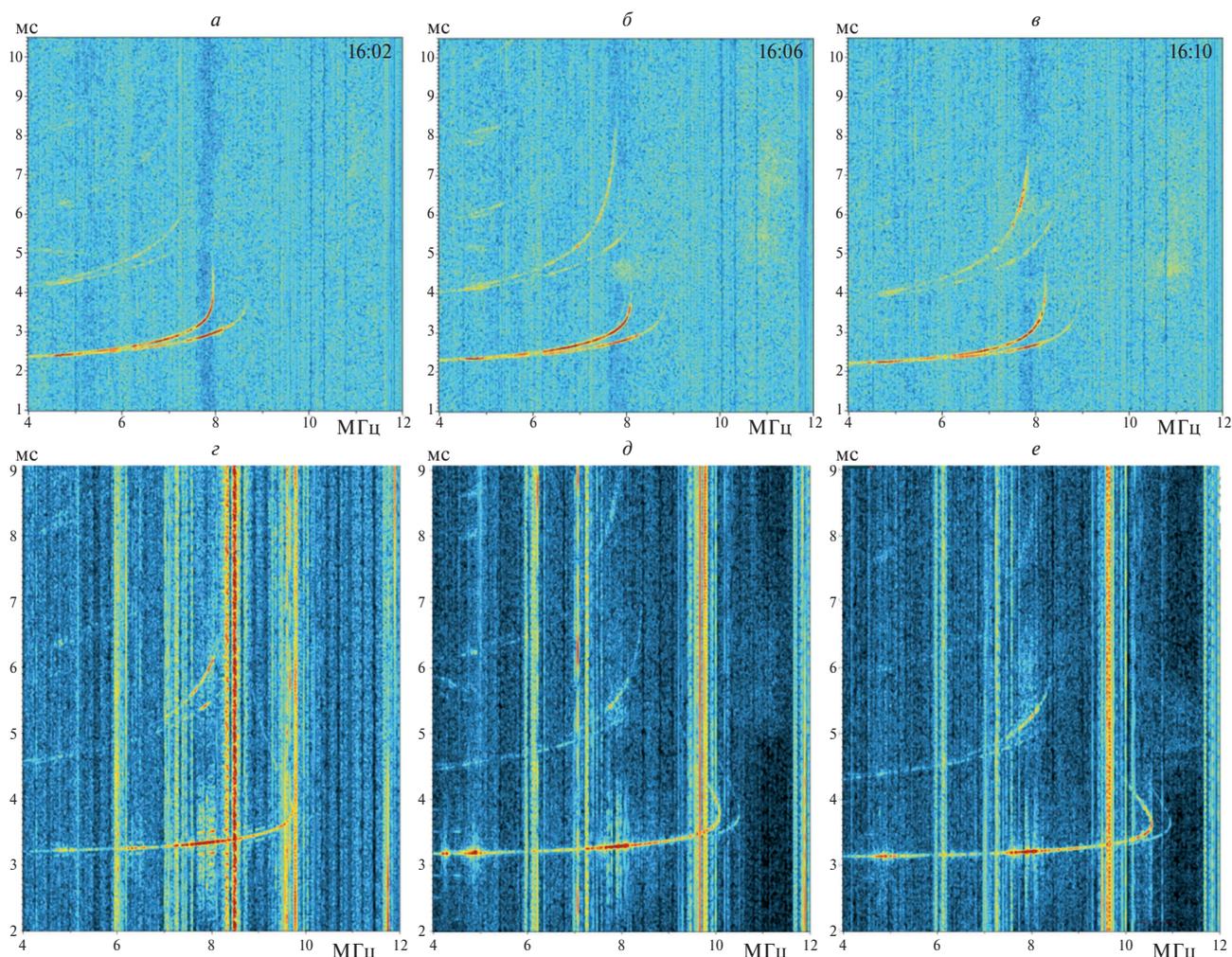


Рис. 3. ДЧХ ионосферы на трассах: Казань–Нижний Новгород (*а–в*); Казань–Троицк (*г–е*) 12 сентября 2023 г. в 16:02, 16:06 и 16:10 UT.

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. 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. 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 регулярно отражения с наименьшей частотой 8 и наи-

большей частотой 12 МГц с диапазоном задержек 4.5–6 мс. В 19:14 мск происходило формирование второй области рассеяния на частотах 7–9 МГц с диапазоном задержек 5.5–6 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.

ЛЧМ-зондирование ионосферы в контрольное вечернее время с 17:30 до 20:00 мск 13 сентября 2023 г. по этим же трассам не выявило областей рассеяния на ДЧХ.

Вертикальное зондирование ионосферы (рис. 4а–е)

Ионозонд САДИ (п. Васильсурск Нижегородской области). 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 диа-

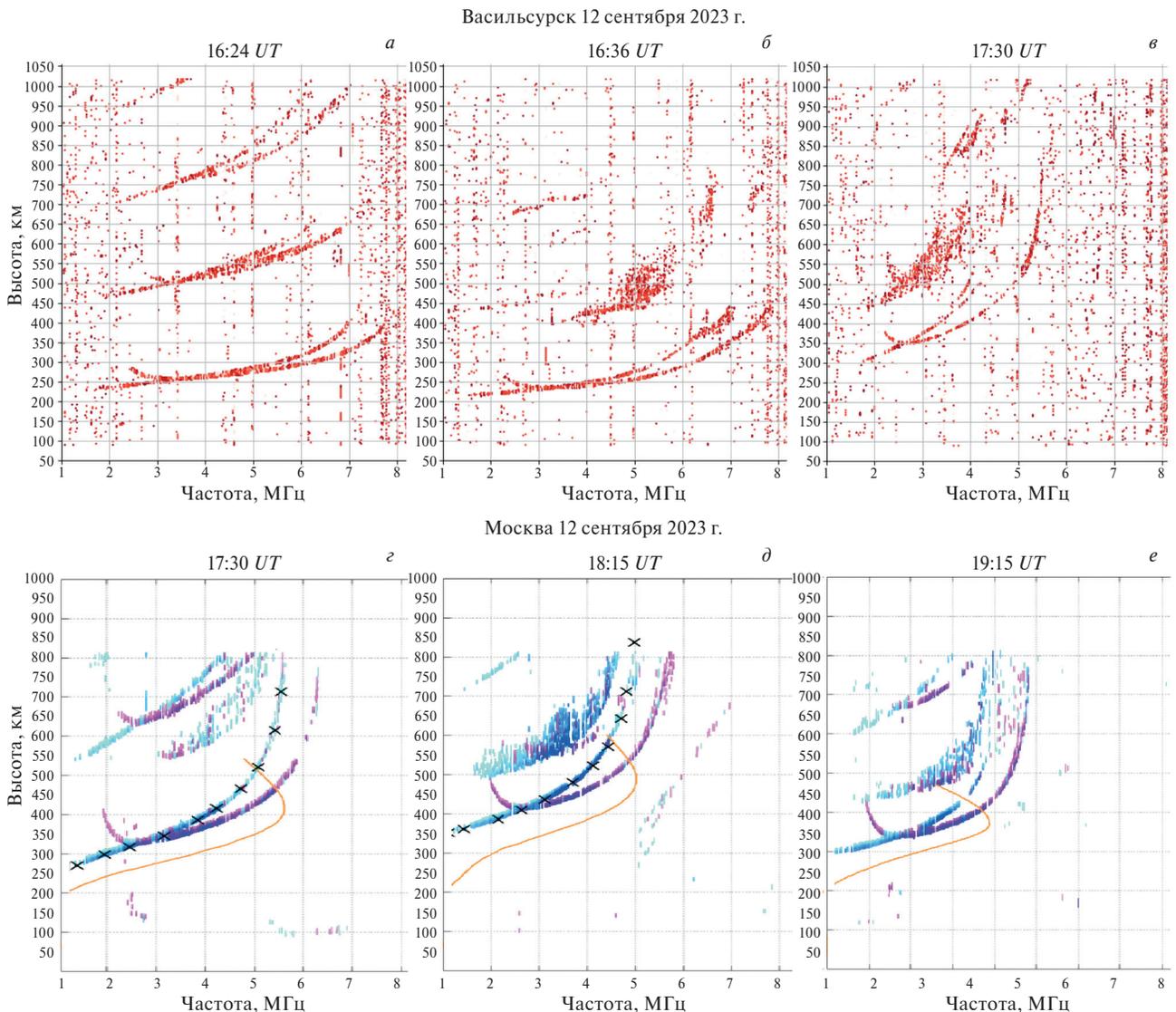


Рис. 4. Ионограммы вертикального зондирования ионосферы, полученные 12 сентября 2023 г. на ионозонде САДИ в п. Васильсурск в 16:24, 16:36 и 17:30 UT (а–в) и на ст. ИЗМИРАН в 17:30, 18:15 и 19:15 UT (г–е).

пазоне 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 (2.2–4.4 МГц, 420–700 км).

Ионозонд «Парус-А» (ИЗМИРАН). Критическая частота F -слоя ионосферы в 18:15 мск была 8.3 МГц. На ионограмме нет признаков возмущений. На ионограмме в 18:30 мск наблюдается диффузность 1–2 балла первого и второго отражений, которая периодически повторяется на следующих ионограммах. В 21:00 мск критическая частота F -слоя равнялась 7 МГц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Известно [14, 15], 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. 4) полярный овал и полярная стенка ГИП находятся на широте Санкт-Петербурга с некоторой динамикой к югу (расчет выполнен по методике [16]), что составляет удаленность от ионозонда ИЗМИРАН ~ 500 км (5° по меридиану). Однако, если оценить удаленность от ионозонда некоей крупномасштабной структуры авроральной ионосферы, дающей дополнительный диффузный след между следами $1F_2$ и $2F_2$ на ионограмме ВЗ (рис. 4е), то с учетом измерений действующей высоты она составит на частоте 3 МГц только ~ 250–300 км, что явно недостаточно для объяснения такого отражения полярной стенкой ГИП. Авроральный E -слой ионосферы (формируется ионизацией частицами на высотах 100–150 км) также не может рассматриваться как источник отражения с высокой интенсивностью, в силу плавности его спадания в меридиональном направлении, и в данном механизме практически отсутствовала бы частотная зависимость в формируемом им следе, что явно не стыкуется с характером экспериментальной регистрации. Поэтому, исходя из общих оценок, наиболее вероятным источником формирования дополнительного следа на этих ионограммах ВЗ ст. ИЗМИРАН и Васильсурск можно рассматривать поляризационный джет [17–19] и сопутствующие процессы в виде SAR (Stable Auroral Red) дуг [20] – области с повышенной температурой плазмы, локализованных южнее полярной стенки ГИП. В пользу данного предположения говорит и высокая степень подобия характера следа

на ст. ИЗМИРАН и Васильсурск, разнесенных по долготе на ~ 550 км (табл. 2). 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). Как правило, ионизация в области полярной стенки ГИП существенно больше, чем на его экваториальной части и, соответственно, выше квазикритические частоты при отражении от нее.

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). Особенно это проявляется на более протяженных радиотрассах: Васильсурск–Троицк и Казань–Троицк (рис. 2 и 3) в виде низкой интенсивности следа. Скользящий механизм отражения для широтного направления радиотрасс НЗ при большом меридиональном градиенте электронной плотности способствует более ранней регистрации дополнительных мод, чем в случае ВЗ. Так для данных НЗ (16:05 UT, рис. 2е) хорошо видна динамическая мода аврорального происхождения, в то время как на данных ВЗ ст. ИЗМИРАН никаких дополнительных следов нет вообще. Таким образом, можно предположить, что в двух методах радиозондирования ионосферы были зарегистрированы отражения от различных крупномасштабных структур авроральной ионосферы: поляризационного джета (ВЗ) и полярной стенки ГИП (НЗ).

Ионосферные неоднородности с различными масштабами, генерируемые в турбулентных динамических областях авроральной ионосферы, могут приводить, в дополнение к геометрическому отражению, к рассеянию радиосигналов, включая и ракурсный (резонансный) механизм их формирования, и, как следствие, к диффузному характеру нестандартных следов на ионограммах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые представлены результаты экспериментальных исследований среднеширотной и субавроральной ионосферы методами наклонного ЛЧМ и вертикального импульсного зондирования комплексом радиофизических средств ди-

агностики 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: поляризованного джета и полярной стенки главного ионосферного провала.

Авторы благодарят г.н.с. Деминова М.Г. (ИЗМИРАН) за обсуждение результатов, в.н.с. НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского Шейнер О.А. за помощь в проведении анализа гелиофизических данных, с.н.с. Падохина А.М., в.н.с. Шубина В.Н. (ИЗМИРАН) и м.н.с. Першина А.В. (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского) за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. // Геомагн. и аэрномия. 1991. Т. 31. № 3. С. 427; *Krasheninnikov I.V., Lyannoi B.E.* // *Geomagn. Aeron.* 1991. V. 31. No. 3. P. 427.
2. *Wagner L.S., Goldstein J.A., Rupar M.A., Kennedy E.J.* // *Radio Sci.* 1995. V. 30. No. 3. P. 659.
3. *Angling M.J., Cannon P.S., Davies N.C. et al.* // *Radio Sci.* 1998. V. 33. No. 1. P. 97.
4. *Milan S.E., Lester M., Jones T.B., Warrington E.M.* // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 1988. V. 60. P. 617.
5. Урядов В.П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофиз. 2004. Т. 47. № 12. С. 1041; *Uryadov V.P., Ponyatov A.A., Kurkin V.I. et al.* // *Radiophys. Quantum Electron.* 2004. V. 47. No. 12. P. 933.
6. *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Kolchev A.A. et al.* // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61. No. 7. P. 1837.
7. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. // Изв. вузов. Радиофиз. 2019. Т. 62. № 2. С. 95; *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Pershin A.V.* // *Radiophys. Quantum Electron.* 2019. V. 62. No. 2. P. 85.
8. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. // Изв. вузов. Радиофиз. 2021. Т. 64. № 2. С. 83; *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Pershin A.V.* // *Radiophys. Quantum Electron.* 2021. V. 64. No. 2. P. 77.
9. *Astafyeva E., Yasyukevich Y.V., Maletckii B. et al.* // *JGR Space Phys.* V. 127. No. 1. Art. No. e2021JA029843.
10. *Vybornov F., Sheiner O., Kolchev A. et al.* // *Atmosphere.* 2022. V. 13. No. 1. P. 84.
11. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. // Геомагн. и аэрномия. 2022. Т. 62. № 2. С. 245; *Kurkin V.I., Polekh N.M., Zolotukhina N.A.* // *Geomagn. Aeron.* 2022. V. 62. No. 1-2. P. 104.
12. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>
13. <https://www.swpc.noaa.gov>
14. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
15. Урядов В.П., Колчев А.А., Вертоградов Г.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофиз. 2017. Т. 60. № 5. С. 396; *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Kolchev A.A. et al.* // *Radiophys. Quantum Electron.* 2017. V. 60. No. 5. P. 355.
16. Деминов М.Г., Шубин В.Н. // Геомагн. и аэрномия. 2018. Т. 58. № 3. С. 366; *Deminov M.G., Shubin V.N.* // *Geomagn. Aeron.* 2018. V. 58. No. 3. P. 348.
17. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. // Изв. вузов. Радиофиз. 2022. Т. 65. № 1. С. 10; *Stepanov A.E., Gololobov A.Yu., Kobyakova S.E., Khalipov V.L.* // *Radiophys. Quantum Electron.* 2022. V. 65. No. 1. P. 9.
18. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Халипов В.Л., Голиков И.А. // Геомагн. и аэрномия. 2021. Т. 61. № 1. С. 60; *Stepanov A.E., Gololobov A.Yu., Khalipov V.L., Golikov I.A.* // *Geomagn. Aeron.* 2021. V. 61. No. 1. P. 68.
19. Синевиц А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др. // Геомагн. и аэрномия. 2023. Т. 63. № 6. С. 764; *Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V. et al.* // *Geomagn. Aeron.* 2023. V. 63. No. 6. P. 747.
20. *Rees M.H., Roble R.G.* // *Rev. Geophys.* 1975. V. 13. No. 1. P. 201.

Ionospheric manifestation of moderate geomagnetic storm on September 12, 2023, based on comprehensive ionospheric radiosonde data

F. I. Vybornov^{a,d,*}, E. Yu. Zykov^b, A. A. Kolchev^b, I. V. Krasheninnikov^c

^a*Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^b*Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^c*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation*

Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

^d*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

The results of studies of the ionosphere on September 12, 2023, by a system of mid-latitude synchronously operating oblique and vertical sounding ionosonde stations are presented, when during the main phase of the development of a class G1 geomagnetic storm, against the background of regular reflections from the F-layer of the ionosphere, strong diffuse reflections from the dynamic structures of the auroral ionosphere were detected.

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