

**ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ 10–13 МАЯ 2024 Г.
В АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ
ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-СИГНАЛОМ**

**EFFECTS OF THE MAY 10–13, 2024 MAGNETIC STORM
IN THE ASIAN REGION OF RUSSIA FROM IONOSPHERIC SOUNDING WITH
A CONTINUOUS CHIRP SIGNAL**

С.Н. Пономарчук 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@iszf.irk.ru*

Н.А. Золотухина 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zolot@iszf.irk.ru*

В.И. Куркин 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kurkin@iszf.irk.ru*

А.Ю. Белинская 

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, belinskayaay@ipgg.sbras.ru*

В.П. Грозов 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, grozov@iszf.irk.ru*

А.В. Ойнац 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, oinats@iszf.irk.ru*

А.И. Поддельский

*Институт космических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, podd-igor@yandex.ru*

А.В. Подлесный 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pav@iszf.irk.ru*

М.В. Цедрик 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mark7cedrick@gmail.com*

S.N. Ponomarchuk

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru*

N.A. Zolotukhina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zolot@iszf.irk.ru*

V.I. Kurkin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kurkin@iszf.irk.ru*

A.Yu. Belinskaya

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics
SB RAS,
Novosibirsk, Russia, belinskayaay@ipgg.sbras.ru*

V.P. Grozov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, grozov@iszf.irk.ru*

A.V. Oinats

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, oinats@iszf.irk.ru*

A.I. Poddelsky

*Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, podd-igor@yandex.ru*

A.V. Podlesnyi

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pav@iszf.irk.ru*

M.V. Cedrik

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mark7cedrick@gmail.com*

Аннотация. Исследованы эффекты экстремальной магнитной бури 10–13 мая 2024 г. в Азиатском регионе России на основе анализа экспериментальных данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. Выявлены особенности ионосферных возмущений, вызванные магнитной бурей: длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2 и максимальных наблюдаемых частот радиотрасс; экранировка отражений от F-области ионосферы спорадическим слоем E_s и увеличенное поглощение KB-сигналов; регистрация E_s-слоев аврорального и косого типов; продолжительный G-эффект в дневное местное время, когда критическая частота F1-слоя превышала критическую частоту F2-слоя; сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума слоя F2. Установлена связь вариаций

Abstract. Effects of the May 10–13, 2024 extreme magnetic storm in the Asian region of Russia have been studied using experimental data from vertical and oblique sounding of the ionosphere with a continuous chirp signal. Features of ionospheric disturbances induced by the magnetic storm have been revealed: the long-lasting negative ionospheric disturbance that was manifested as a significant decrease in F2-layer critical frequencies and maximum observed frequencies of radio paths; the absence of HF signal reflections from F-region due to sporadic E_s layer and increased absorption of HF signals; recording of auroral and oblique E_s layers; the long-lasting G-effect during local daytime during which the F1-layer critical frequency exceeded the F2-layer critical frequency; the dusk enhancement of electron density and F2-layer peak height. We have found a correlation of variations in ionospheric parameters and the maximum observed frequencies of HF radio

ионосферных параметров и максимальных наблюдаемых частот модов распространения КВ-радиоволн с пространственным положением главного ионосферного провала и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний электронов.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, распространение радиоволн, магнитосфера, ионосфера, главный ионосферный провал, диффузные высыпания электронов.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные бури, изменяющие структуру магнитосферы и ионосферы, нарушают работу технологических систем. Вероятность нарушений растет с увеличением интенсивности бури, для измерения которой чаще всего используются индексы K_p [<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>] и Dst [Gonzalez et al., 1994; Loewe, Prolss, 1997; Echer et al., 2008].

Начавшаяся 10 мая 2024 г. магнитная буря с минимумом $Dst = -406$ нТл и максимумом $K_p = 9$, получившая название Mother's Day superstorm [Spogli et al., 2024], является великой по критерию $Dst \leq -350$ нТл [Loewe, Prolss, 1997] и экстремальной по критерию $K_p = 9$. Такие бури очень редки. Они составляют менее 1 % зарегистрированных магнитных бурь [Loewe, Prolss, 1997; Collado-Villaverde et al., 2024]. Исследования возмущений магнитосферно-ионосферной системы во время каждой из них необходимы для создания обобщенной картины физических процессов в околоземном космическом пространстве во время великих бурь.

Результаты комплексного анализа экспериментальных данных, полученных 29 октября – 1 ноября 2003 г. во время великой бури, известной как Halloween storm, представлены в работах [Панасюк и др., 2004; Жеребцов и др., 2005]. Авторы показали, что в ходе бури такие структуры, как экваториальная граница аврорального овала, внутренняя кромка плазменного слоя, зоны диффузных и дискретных высыпаний электронов, главный ионосферный провал (ГИП) и западный электроджет, обычно расположенные в авроральной и субавроральной зонах, сместились в средние широты. На ионограммах вертикального зондирования (ВЗ) эти смещения проявились 29–31 октября в виде интервалов blackout и спорадических E-слоев типов a, s, f, частично или полностью экранировавших F-область ионосферы над Москвой ($L \sim 2.6$) и Иркутском ($L \sim 2.2$) [Панасюк и др., 2004; Жеребцов и др., 2005]. На трассах наклонного зондирования (НЗ) изменение положения ГИП и зоны диффузных высыпаний электронов во время бури приводило к сильным вариациям максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) модов распространения радиоволн, отклонению траекторий распространения сигналов от дуги большого круга, появлению аномальных диффузных сигналов с задержками, превышающими задержки основных модов распространения [Куркин и др., 2004; Урядов и др., 2004; Uryadov et al., 2005].

wave propagation modes with spatial location of the main ionospheric trough and the equatorial boundary of the diffuse electron precipitation zone.

Keywords: ionospheric disturbances, radio wave propagation, magnetosphere, ionosphere, main ionospheric trough, diffuse electron precipitation.

Следующая великая буря, начавшаяся 20 ноября 2003 г., также сопровождалась сильными ионосферными возмущениями, вследствие которых на ионограммах ВЗ, полученных в Восточной Сибири на средних широтах, регистрировались экранирующие E_s-слои и длительные интервалы blackout [Жеребцов и др., 2005]. Отражения от слоя E_s были отчетливо видны на ионограммах в Норильске ($L \sim 5.5$), Жиганске ($L \sim 4.4$) и Якутске ($L \sim 3.3$) и менее явно на ионограммах в Иркутске ($L \sim 2.2$). В работе [Mishin et al., 2018] на основе техники инверсии магнитограмм было показано, что в 16:30–22:30 UT 20 ноября (последние шесть часов главной фазы бури) экваториальная граница аврорального овала многократно смещалась до широт ниже широты Иркутска. В указанном временном интервале ст. «Иркутск» находилась в полуночно-утреннем секторе (23:30–05:30 LT). В это же время на ионограммах ВЗ, полученных в вечернем секторе (16:30–22:30 LT) на широтах от 37.1° N ($L \sim 1.3$) до 51.5° N ($L \sim 2.2$), наблюдались подъем и расширение F-области ионосферы и ее экранировка E_s-слоями типов a, k, r [Blanch et al., 2005]. На трассах наклонного зондирования на главной фазе бури регистрировались длительные интервалы blackout.

По минимуму индекса Dst (–406 нТл) рассматриваемая майская буря 2024 г. — шестая из десяти великих бурь, наблюдавшихся с начала 1957 г. до ноября 2024 г., но первая по максимальному значению A_p -индекса, составлявшему 271. Индекс A_p равен среднему значению восьми полученных в течение суток трехчасовых значений ap -индекса, который является входным параметром в модели расчета инвариантной широты (Φ) дна ГИП, представленной в работе [Деминов, Шубин, 2018]. Перспективность применения этой модели для оценки местоположения ГИП для слабых, умеренных и сильных магнитных бурь показана, например, в работе [Пономарчук, Золотухина, 2024]. Большое значение $A_p = 271$ дает основание предполагать, что в майскую бурю 2024 г. уменьшение инвариантной широты дна ГИП могло быть значительнее, чем во время других великих бурь. В [Spogli et al., 2024] показано, что 10 мая в главную фазу Mother's Day superstorm понижения критической частоты слоя F2 (f_oF2), полного электронного содержания (ПЭС) и интервалы blackout, характерные для ГИП, наблюдались в Италии на широтах 37.9°–41.8° N.

В данной работе рассмотрены эффекты магнитной бури на основе анализа данных вертикального

и наклонного зондирования ионосферы непрерывным сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [Подлесный и др., 2013; Kurkin et al., 2024a] с привлечением эмпирических моделей инвариантных широт дна ГИП [Деминов, Шубин, 2018] и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний (ГДВ) электронов с энергией ≥ 100 эВ [Kamide, Winningham, 1977] и модели напряженности поля магнитосферной конвекции E_c [Burke et al., 2007]. Использовались также данные по пространственному распределению полного электронного содержания. Основная цель работы — исследование влияния процессов магнитосферно-ионосферного взаимодействия на условия распространения радиоволн в Азиатском регионе России в период великой магнитной бури 10–13 мая 2024 г.

1. ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ИХ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ИСТОЧНИКИ

1.1. Проявления бури в геомагнитных индексах

Согласно увеличению K_p -индекса до 8– и Dst -индекса до 66 нТл (рис. 1, а), рассматриваемая великая магнитная буря началась 10 мая в интервале 15:00–18:00 UT. Значения K_p - и Dst -индексов взяты на сайтах [https://kp.gfz-potsdam.de/en/data] и [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html] соответственно. Основываясь на монотонном увеличении Dst -индекса от 1 нТл в 13–14 UT до 66 нТл в 17–18 UT 10 мая, можно полагать, что 3-часовой интервал 15:00–18:00 UT, в котором значения Dst были положительны, является начальной фазой бури. Изменения 1-минутных значений $SYM-H$, сопоставленные на рис. 1, а с вариациями Dst , показывают, что резкое увеличение $SYM-H$ -индекса от 10 до 88 нТл произошло в течение 9 мин (в 17:06–17:15 UT 10 мая). По времени это изменение соответствует увеличению динамического давления солнечного ветра P_{sw} на 31 нПа, что характерно для бурь с внезапным началом. Значения $SYM-H$ были положительны в течение 47 мин, до 17:53 UT. После этого в течение ~9 ч главной фазы бури Dst - и $SYM-H$ -индексы уменьшались, к 02:30 UT 11 мая достигнув минимальных значений $Dst = -406$ нТл и $SYM-H = -518$ нТл. Затем в течение суток, до ~02:30 UT 12 мая, Dst -индекс относительно быстро увеличивался, что соответствует ранней восстановительной фазе бури [Daglis, 2001]. Поздняя восстановительная фаза бури закончилась в 18:30 UT 13 мая.

Максимальные значения $K_p = 9$ были зарегистрированы в 00–03 UT (последние 3 ч главной фазы бури) и в 09–12 UT (ранняя восстановительная фаза) 11 мая. Во втором из указанных интервалов Dst -индекс увеличился на 100 нТл, что, как показано в [Iyemori, Rao, 1996], может происходить во время суббурь из-за ослабления токов нейтрального слоя хвоста магнитосферы.

Временные интервалы фаз бури, определенные по изменениям индексов $SYM-H$ (начальная и главная фазы) и Dst (восстановительные фазы), указаны в таблице.

1.2. Основные характеристики межпланетного источника бури

Рассматриваемая буря была вызвана воздействием комплексной межпланетной неоднородности, сформированной серией выбросов корональной массы. На [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/] семь из них определены как корональные выбросы типа halo. На рис. 1, б показаны изменения некоторых параметров этой неоднородности. Серым прямоугольником на этом и на следующих рисунках отмечены начальная и главная фазы бури, вертикальными серыми линиями — моменты окончания ранней и поздней восстановительной фаз бури.

Начальная 47-минутная фаза бури развивалась под влиянием ее лидирующей области, в которой скорость ($V_{sw} \sim 600$ км/с), концентрация ионов ($N_{sw} \sim 30$ см⁻³) и динамическое давление ($P_{sw} \sim 18$ нПа) солнечного ветра (СВ), а также модуль ($B_t \sim 7$ нТл) межпланетного магнитного поля (ММП) были заметно больше, чем в расположенном перед ней медленном СВ (см. рис. 1, б). Величины азимутальной (B_y) и вертикальной (B_z) компонент ММП в ней составляли -2 и -6 нТл.

Главная фаза бури соответствует области СВ с $V_{sw} \sim 700$ км/с, самыми большими значениями N_{sw} , P_{sw} и преимущественно отрицательной вертикальной компонентой ММП, дважды понижавшейся до экстремальных для данного события значений $B_z = -35$ и -35.3 нТл.

В области межпланетного источника, ответственного за раннюю восстановительную фазу бури, скорость увеличилась до максимальной для данного события $V_{sw} \sim 1000$ км/с, N_{sw} и P_{sw} заметно уменьшились, а отрицательная B_z -компонента к концу ранней восстановительной фазы постепенно приблизилась к положительным значениям. Дальнейшее ослабление отрицательной B_z и уменьшения N_{sw} , P_{sw} и V_{sw} привели к переходу от ранней к поздней восстановительной фазе бури.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

ИСЗФ СО РАН совместно с ИНГГ СО РАН и ИКИР ДВО РАН организован непрерывный мониторинг состояния ионосферы в Азиатском регионе России по данным вертикального, слабонаклонного (СНЗ) и наклонного зондирования. Зондирование ионосферы проводится с использованием многофункционального цифрового ионозонда с непрерывным ЛЧМ-сигналом, разработанного в ИСЗФ СО РАН [Подлесный и др., 2013; Kurkin et al., 2024b]. Геометрия трасс НЗ приведена на рис. 2. Передающие пункты расположены вблизи Иркутска (52.88° N, 103.26° E), Магадана (60° N, 150.7° E), Хабаровска (47.6° N, 134.7° E), Новосибирска (55° N, 83° E) и Норильска (69.4° N, 88.4° E). Приемные пункты — ст. «Иркутск» (с. Торы (51.8° N, 103° E), Бурятия) и ст. «Новосибирск» (55° N, 83° E). Анализ данных НЗ позволяет исследовать влияние динамики крупномасштабных структур (главного ионосферного провала, зоны диффузных высыпаний электронов) на вариации

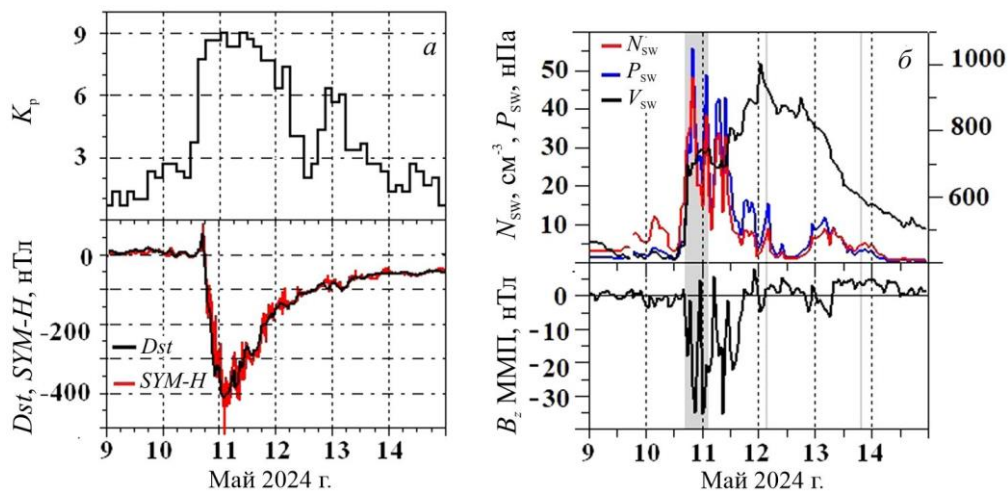


Рис. 1. Изменения K_p -, Dst - и $SYM-H$ -индексов 9–14 мая 2024 г. (а) и соответствующие им изменения среднечасовых значений параметров межпланетной среды (б): концентрации ионов (N_{sw}), динамического давления (P_{sw}) и скорости (V_{sw}) солнечного ветра, а также B_z -компоненты ММП. На панели (б) и на рис. 3, 5, 7–9 серым прямоугольником отмечены начальная и главная фазы бури, вертикальными серыми линиями — моменты окончания ее ранней и поздней восстановительной фаз

Интервалы развития фаз бури 10–13 мая 2024 г.

Фаза	Начало		Конец		Экстремумы	
	день, мес.	UT	день, мес.	UT	Dst , нТл	K_p
Начальная	10.05	17:06	10.05	17:53	66	8–
Главная	10.05	17:54	11.05	02:14	–406	9
Ранняя восстановительная	11.05	02:30	12.05	02:30		
Поздняя восстановительная	12.05	02:30	13.05	18:30		

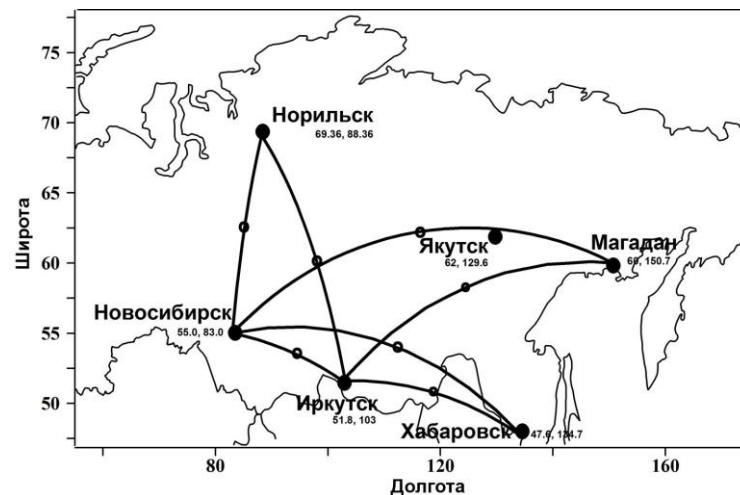


Рис. 2. Трассы наклонного зондирования в Азиатском регионе России

характеристик ионосферы и распространение КВ-сигналов во время геомагнитных бурь [Пonomарчук, Золотухина, 2024; Kurkin et al., 2024a]. Вертикальное зондирование ионосферы проводится в пунктах «Иркутск» и «Новосибирск». Учащенный режим (со скважностью 1 мин и менее) ВЗ и СНЗ ионосферы позволяет реализовать алгоритмы вычисления скорости движения ионосферных возмущений с масштабами десятки километров [Ларюнин и др., 2024] и исследовать морфологические особенности таких возмущений. Зондирование со скважностью 5 мин

на односкачковых трассах НЗ позволяет исследовать характеристики перемещающихся ионосферных возмущений с пространственными масштабами сотни километров в различных гелиогеофизических условиях в субполярной и среднелириотной ионосфере [Kurkin et al., 2024b].

В период майской бури 2024 г. передающие пункты в Норильске и Хабаровске не функционировали по техническим причинам, поэтому экспериментальные исследования распространения радиоволн проводились на радиотрассах НЗ Магадан—

Иркутск (протяженность $D=3034$ км, долгота средней точки $\lambda=124.21^\circ$ Е, инвариантная широта $\Phi=53.39^\circ$), Магадан—Новосибирск ($D=3901$ км, $\lambda=114.2^\circ$ Е, $\Phi=57.77^\circ$) и Новосибирск—Иркутск ($D=1372$ км, $\lambda=93.4^\circ$ Е, $\Phi=50.17^\circ$).

Для предварительного анализа большого массива ионограмм ВЗ и НЗ (около 25 000) использовались автоматическая обработка и интерпретация ионограмм [Grozov et al., 2012; Ponomarchuk et al., 2023; Пономарчук, Грозов, 2024]. По результатам обработки и интерпретации ионограммы ВЗ выделялась высотнo-частотная характеристика (ВЧХ). Трек ВЧХ использовался для отсчета критических частот и минимальных высот отражения для каждого ионосферного слоя и расчета высотного профиля плазменной частоты $f_e(h)$ [Михайлов, 2000]. По $f_e(h)$ -профилю определялись ионосферные параметры слоя F2: критическая частота и высота максимума h_mF2 . На ионограмме ВЗ также выделялся трек спорадического слоя E_s и определялись его параметры — высота, критическая частота и частота экранировки F-отражений. Тип слоя E_s не идентифицировался.

Во время продолжительного отрицательного ионосферного возмущения, сопровождавшего магнитную бурю, на ионограммах ВЗ наблюдался G-эффект — экранировка слоя F2 слоем F1 в дневные часы местного времени, что приводило к неправильной идентификации сигналов, отраженных от этих слоев. Поэтому данные автоматической обработки ионограмм ВЗ корректировались в интерактивном режиме.

По результатам обработки ионограмм ВЗ и НЗ строились временные зависимости критических частот ионосферных слоев F2 (f_oF2), F1 (f_oF1), E (f_oE), E_s (f_oE_s) и максимальных наблюдаемых частот модов распространения для сигналов, отраженных от слоев ионосферы F2 (МНЧ1F2 и МНЧ2F2), F1 (МНЧ1F1), E (МНЧ1E) и E_s (МНЧ1 E_s , МНЧ2 E_s). Термин «мод распространения» описывает распространение радиоволн посредством отражения (однократное, двукратное и т. д.) от слоев ионосферы — 1E, 1 E_s , 1F1, 1F2, 2F2 и т. д. Детальная идентификация отраженных от ионосферы сигналов и анализ распространения и рассеяния радиоволн проводились по экспериментальным ионограммам. Привлекались также эмпирические модели инвариантных широт дна ГИП и ГДВ и модель напряженности поля магнитосферной конвекции.

3. ПРОЯВЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ В ДАННЫХ ВЗ И НЗ

Геомагнитные бури сопровождаются различного рода возмущениями в ионосфере (ионосферными бурями), изменяющими условия распространения КВ-радиоволн. Наиболее значительное влияние на распространение радиоволн оказывает пространственное положение крупномасштабных структур, в первую очередь ГИП и зоны диффузных высыпаний электронов. Известно, что главную роль в формировании крупномасштабных структур магнитосферно-ионосферной системы, таких как плазмопауза, внутренняя кромка плазменного слоя, экваториальная и полярная границы аврорального овала, играет

электрическое поле магнитосферной конвекции [Сергеев, Цыганенко, 1980; Нишида, 1980]. Усиление поля магнитосферной конвекции приводит к смещению внутренней границы плазменного слоя и внешней границы плазмосферы вглубь магнитосферы, а их ионосферных проекций в сторону экватора. Соответственно смещаются на более низкие широты ГИП, расположенный между авроральным овалом и плазмопаузой, и характерные для ГИП неоднородности электронной концентрации, влияющие на распространение КВ-радиоволн. Напряженность поля магнитосферной конвекции определяется параметрами околоземной межпланетной среды. В данной работе ее величина рассчитывалась по значениям V_{sw} , P_{sw} , B_y и B_z ММП [Burke et al., 2007]. Положение ГИП оценивалось по эмпирической модели инвариантной широты дна провала [Деминов, Шубин, 2018]. Для оценки положения зоны диффузных высыпаний электронов с энергией ≥ 100 эВ, которые вызывают увеличение электронной концентрации в F-области ионосферы [Fang et al., 2008], рассчитывалась широта экваториальной границы зоны диффузных высыпаний [Kamide, Winningham, 1977]. В возмущенных условиях высыпания электронов приводят к возрастанию концентрации электронов в F2-слое ионосферы вблизи полярной стенки ГИП [Гальперин и др., 1977; Халипов и др., 1977]. В послеполуденные часы в условиях высокой геомагнитной активности могут образовываться дополнительные области повышенной электронной концентрации внутри ГИП — гребни электронной концентрации [Беспрозванная, Бенькова, 1988; Жеребцов и др., 1988], а также структуры из магнитоориентированных мелкомасштабных неоднородностей — «завесы» по терминологии авторов работ [Möller, 1974; Pilkington et al., 1975]. Для оценки полного электронного содержания использовались карты ПЭС [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>].

3.1. Ионосферные возмущения по данным ВЗ

Ионосферные возмущения во время магнитной супербури в мае 2024 г. наиболее ярко проявились в данных вертикального зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. Малая скважность регистрации ионограмм ВЗ (от 1 мин до 15 с) и высокое пространственно-частотное разрешение позволяют детально исследовать динамические процессы в ионосфере и выделять особенности изменения ионосферных параметров.

3.1.1. Станция «Новосибирск»

На рис. 3 показаны вариации критических частот ионосферных слоев F2, F1 и E_s , инвариантных широт дна ГИП и ГДВ на меридиане 90° Е и напряженности поля магнитосферной конвекции E_c 9–14 мая 2024 г., а также ионограммы ВЗ 10–11 мая 2024 г. на ст. «Новосибирск». На верхних панелях черными точками показаны экспериментальные значения критических частот в возмущенных условиях, полученные в результате обработки ионограмм ВЗ, красными линиями — значения критических частот ионосферных слоев F2 и F1 для спокойного дня 9 мая 2024 г., синей линией — результаты определения ПЭС

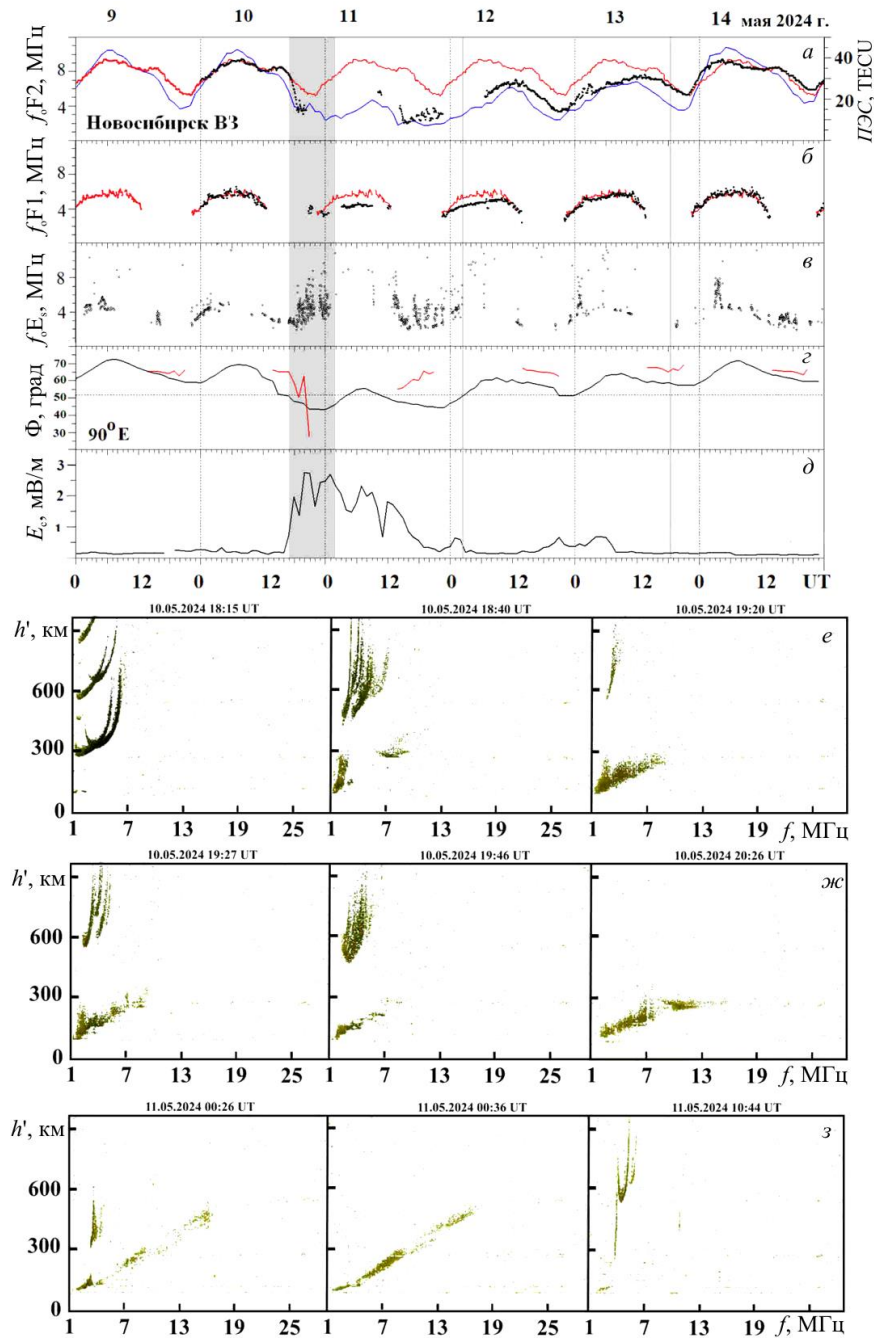


Рис. 3. Наблюдавшиеся 9–14 мая 2024 г. вариации ПЭС (синяя линия), текущих (черные точки) и фоновых (красная линия) значений f_oF2 (а), f_oF1 (б), f_oE_s (в); вариации инвариантных широт дна ГИП (черная линия) и ГДВ (красная линия) на меридиане 90° E (з) и напряженности поля магнитосферной конвекции E_c (д); ионограммы ВЗ, полученные в пункте «Новосибирск» 10–11 мая 2024 г. (е–з)

в точке с координатами 55° N, 90° E по картам [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov].

В главную и восстановительную фазы бури наблюдалось длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2 (см. рис. 3, а). Причиной ионосферного возмущения были смещение ГИП и повышение скорости рекомбинации ионов кислорода, обусловленное изменением состава нейтральной атмосферы и ростом температуры верхней атмосферы во время геомагнитных бурь

[Prölss et al., 1991; Павлов, 2011]. Экстремальные значения относительных отклонений критических частот от фоновых значений $\sim 76\%$ наблюдались 11 мая. Большие уменьшения критической частоты были зарегистрированы в тех временных интервалах, в которых дно ГИП, рассчитанное по модели [Демин, Шубин, 2018], находилось южнее станции ВЗ, а f_oF2 понижалась до уровня 2–3 МГц, характерного для ГИП [Pirog et al., 2009]. При этом критические частоты слоя F1 также уменьшились на главной и ранней восстановительной фазах бури

(11 и 12 мая). Их экстремальные отклонения от фоновых значений составляли ~25 %. Отрицательное ионосферное возмущение продолжалось до 14 мая.

Зарегистрированные на ст. «Новосибирск» ионограммы ВЗ приведены на рис. 3, *е–з*. Магнитная буря началась в 17:06 UT 10 мая (см. таблицу). На главной фазе поле магнитосферной конвекции сильно увеличилось, что привело к смещению ГИП и ГДВ в средние широты, включая широту расположения станции ВЗ в Новосибирске (рис. 3, *з*). На рисунке инвариантная широта ст. «Новосибирск» отмечена горизонтальной пунктирной линией. Проявления ионосферных возмущений на ионограммах ВЗ ст. «Новосибирск» начинаются с 18:15 UT, когда были зарегистрированы сигналы со слабым F-рассеянием. Позднее на ионограммах наряду с регулярными сигналами присутствуют дополнительные диффузные сигналы, отраженные как от полярной стенки ГИП, так и от слоя E_s . Критические частоты слоя F2 уменьшаются, а высоты максимума слоя увеличиваются, что является признаком расположения станции ВЗ в зоне ГИП [Бенькова и др., 1993]. Ионограмма в 18:40 UT на рис. 3, *е* иллюстрирует структуру отраженных сигналов в случае прохождения ГИП и зоны диффузных высыпаний электронов через зенитный сектор излучения станции ВЗ. Помимо основных сигналов вертикального зондирования на ионограмме присутствуют диффузные сигналы, соответствующие боковым отражениям от полярной стенки ГИП. Высыпания частиц на внутренней границе плазменного слоя также приводят к образованию E_s -слоя аврорального типа и к развитию сильной плазменной турбулентности, которая обуславливает образование мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностей, на которых происходит обратное ракурсное рассеяние радиоволн, формирующее наклонные отражения от слоя E — косые E_s [Руководство..., 1977]. Ионограммы с косыми E_s -слоями представлены на рис. 3, *е–з*. Ионограмма в 19:46 UT 10 мая на рис. 3, *ж* соответствует времени, когда станция ВЗ в Новосибирске находилась в зоне диффузных высыпаний электронов (рис. 3, *з*). Отчетливо виден «ступень» лучей для сигналов, отраженных от ионосферных неоднородностей в области F2.

Регулярные сигналы, отраженные от F2-слоя, наблюдались до 20:20 UT 10 мая одновременно с дополнительными диффузными сигналами, отраженными от полярной стенки ГИП и слоя E_s . С 20:20 UT 10 мая до 01:00 UT 11 мая на ионограммах наблюдались только следы отражений от E_s и эпизодически от F1, а в околополуденном секторе — только от F1. Отражение от F2-слоя частично восстановилось в интервале 14:20–22:35 UT 11 мая (ранняя восстановительная фаза бури), когда значения f_oF2 были экстремально низкими. В этом же временном интервале регистрировались отражения от E_s -слоя.

Согласно результатам моделирования инвариантной широты дна ГИП (см. рис. 3, *з*), станция ВЗ «Новосибирск» 10–13 мая находилась в зоне провала в вечернем и ночном секторах местного времени. Это подтверждается результатами восстановления положения полярного овала по спутниковым данным GUVI DMSP SSUSI [https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs]

и профилей ПЭС в выбранных меридиональных направлениях по картам [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>]. На рис. 4, *а–г* приведены географические карты с границами аврорального овала, восстановленными по спутниковым данным для 22:10–23:51 UT 10 мая 2024 г. Видно, что в 23:51 UT 10 мая станция ВЗ «Новосибирск» действительно находилась вблизи экваториальной границы овала, в области ГИП.

На рис. 4, *д* приведены графики распределения ПЭС вдоль меридианов 85° и 105° E в 22:15, 22:30 и 22:45 UT 10 мая. Соответствующие различным моментам времени графики последовательно сдвинуты вдоль оси абсцисс на 5 TECU. Распределения ПЭС (см. рис. 4, *д*) показывают, что в 22:15–22:45 UT 10 мая ст. «Новосибирск» находилась под полярной стенкой ГИП, а ст. «Иркутск» — на широтах дна ГИП.

Отличительной особенностью ионосферной бури, сопровождавшей рассматриваемую магнитную бурю, является наблюдавшийся в дневные часы 11 и 12 мая продолжительный G-эффект, во время которого критическая частота F1-слоя превышала критическую частоту F2-слоя: $f_oF1 > f_oF2$ [Polekh et al., 2013, 2015]. Известно, что вероятность возникновения G-эффекта увеличивается с ростом K_p -индекса [Демин и др., 2011]. В восстановительную фазу бури непрерывный интервал регистрации G-эффекта на ст. «Новосибирск» составил почти 6 ч (с 02:54 до 09:10 UT) 11 мая и 8 ч (с 22:45 до 06:45 UT) 11–12 мая.

Следующая особенность проявления ионосферной бури в данных ВЗ в Новосибирске и, как будет показано ниже, в Иркутске — зарегистрированный на заходе Солнца около 10:40 UT (16:40 LT) 11 мая кратковременный сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума слоя F2 (dusk effect [Buonsanto, 1995]). В качестве иллюстрации данного эффекта на рис. 3, *з* приведена ионограмма, полученная в 10:44 UT 11 мая. Заметим, что в это время напряженность поля конвекции резко уменьшилась почти до среднего уровня в невозмущенных условиях, а потом резко увеличилась (см. рис. 3, *д*), что может быть причиной появления сумеречного эффекта [Тащилин, Романова, 2011].

3.1.2. Станция «Иркутск»

Рассмотрим особенности ионосферных возмущений по данным ВЗ в пункте «Иркутск». На рис. 5 приведены графики вариаций критических частот ионосферных слоев F2, F1, E_s и инвариантных широт дна ГИП и ГДВ на меридиане 105° E для 9–14 мая 2024 г., а также ионограммы ВЗ, полученные в пункте «Иркутск» 10–11 мая 2024 г.

Как и на ст. «Новосибирск», на ст. «Иркутск» на главной и восстановительной фазах бури наблюдалось длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2 (см. рис. 5, *а*). Экстремальное уменьшение ~72 % f_oF2 относительно фоновых значений наблюдалось 11 мая. При этом, так же как на ст. «Новосибирск», значения f_oF1 уменьшились только на главной и ранней восстановительной фазах бури (11 и 12 мая). Экстремальное отклонение f_oF1 от фоновых значений составляло ~25 %. Из-за смещения ГИП в область зондирования

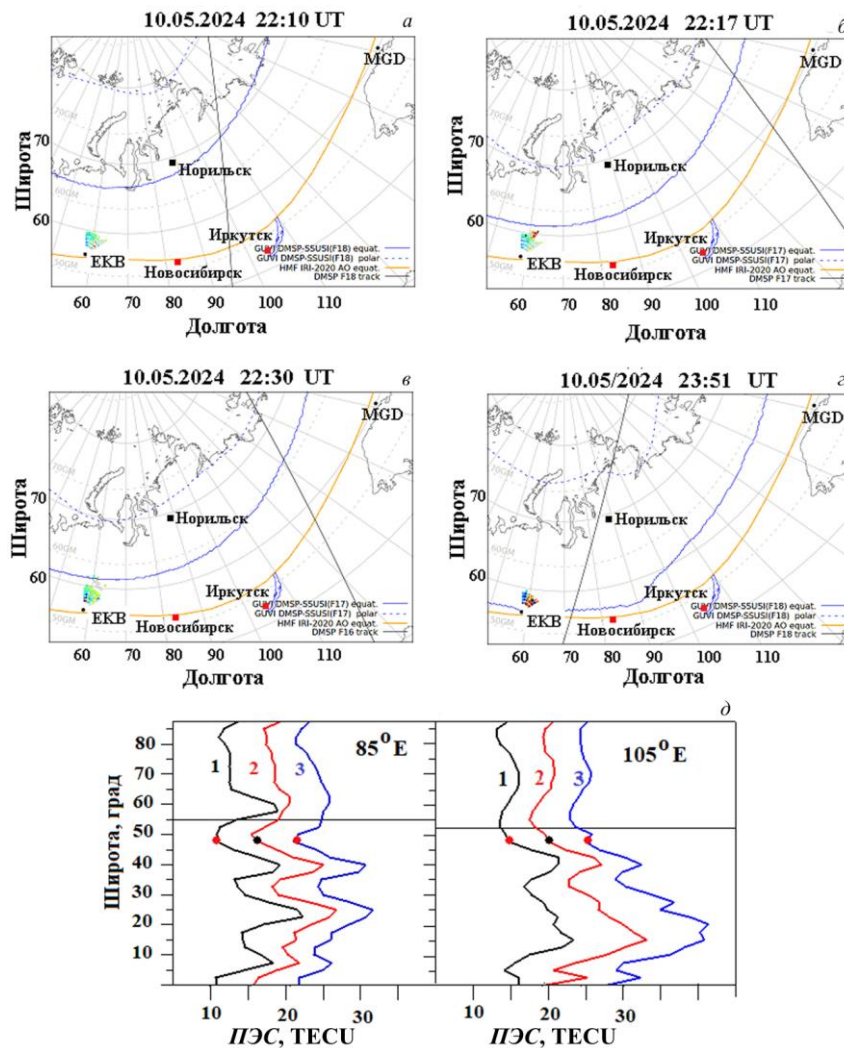


Рис. 4. Динамика аврального овала 22:10–23:51 UT 10.05.2024 (а–г): синие штриховая и сплошная линии — соответственно его полярная и экваториальная границы, построенные по данным DMSP; оранжевая — его экваториальная граница, определенная по модели IRI-2020 [Bilitza и др., 2022; Zhang, Paxton, 2008]; черным прямоугольником отмечено положение ст. «Норильск», красными — ст. «Новосибирск» и «Иркутск»; наклонной прямой показана траектория спутника DMSP. Распределение ПЭС (д) вдоль меридианов 85° E (слева) и 105° E (справа) в 22:15, 22:30 и 22:45 UT 10 мая (линии 1, 2, 3 соответственно): горизонтальная линия — широты ст. «Новосибирск» (слева) и «Иркутск» (справа); красные и черные кружки — широта дна ГИП по модели [Деминов, Шубин, 2018]

станции ВЗ «Иркутск» и повышенной скорости рекомбинации ионов кислорода, обусловленной изменением состава нейтральной атмосферы и повышением температуры верхней атмосферы [Prölss et al., 1991; Павлов, 2011], отрицательное ионосферное возмущение продолжалось до 14 мая.

Ионосферные возмущения на ионограммах ВЗ ст. «Иркутск» проявились в виде F-рассеяния сигналов и уменьшения критической частоты слоя F2 относительно фоновых значений в 17:37 UT, т. е. на 38 мин раньше, чем на ст. «Новосибирск». Ионограмма, иллюстрирующая эти явления в 17:50 UT, приведена на рис. 5, д. Под действием поля магнитосферной конвекции (см. рис. 3, д) ГИП и ГДВ смещаются на широты, близкие к инвариантной широте станции ВЗ «Иркутск» (горизонтальная пунктирная линия на рис 5, г). На ионограммах ВЗ наряду с регулярными регистрируются дополнительные диффузные

сигналы, отраженные от полярной стенки ГИП. Действующая высота отражения сигналов от слоя F2 увеличивается (см. рис. 5, д–е).

Ионограмма ВЗ в 21:15 UT (см. рис. 5, е) иллюстрирует структуру отраженных сигналов в случае, когда станция ВЗ расположена в зоне диффузных высыпаний электронов. Виден «сгусток» лучей для сигналов, отраженных от ионосферных неоднородностей в слое F2. По форме он подобен пучку лучей, зарегистрированному на ст. «Новосибирск» в 19:46 UT 10 мая (см. рис. 3, ж), но наблюдается на меньших высотах и частотах. Высыпания частиц на внутренней границе плазменного слоя вызвали образование E_s-слоев аврального и запаздывающего типов, показанных на ионограммах на рис. 5, е [Руководство..., 1977]. Косые E_s-слои на ионограммах ст. «Иркутск» в период магнитной бури не регистрировались. Высыпания электронов могут приводить к образованию

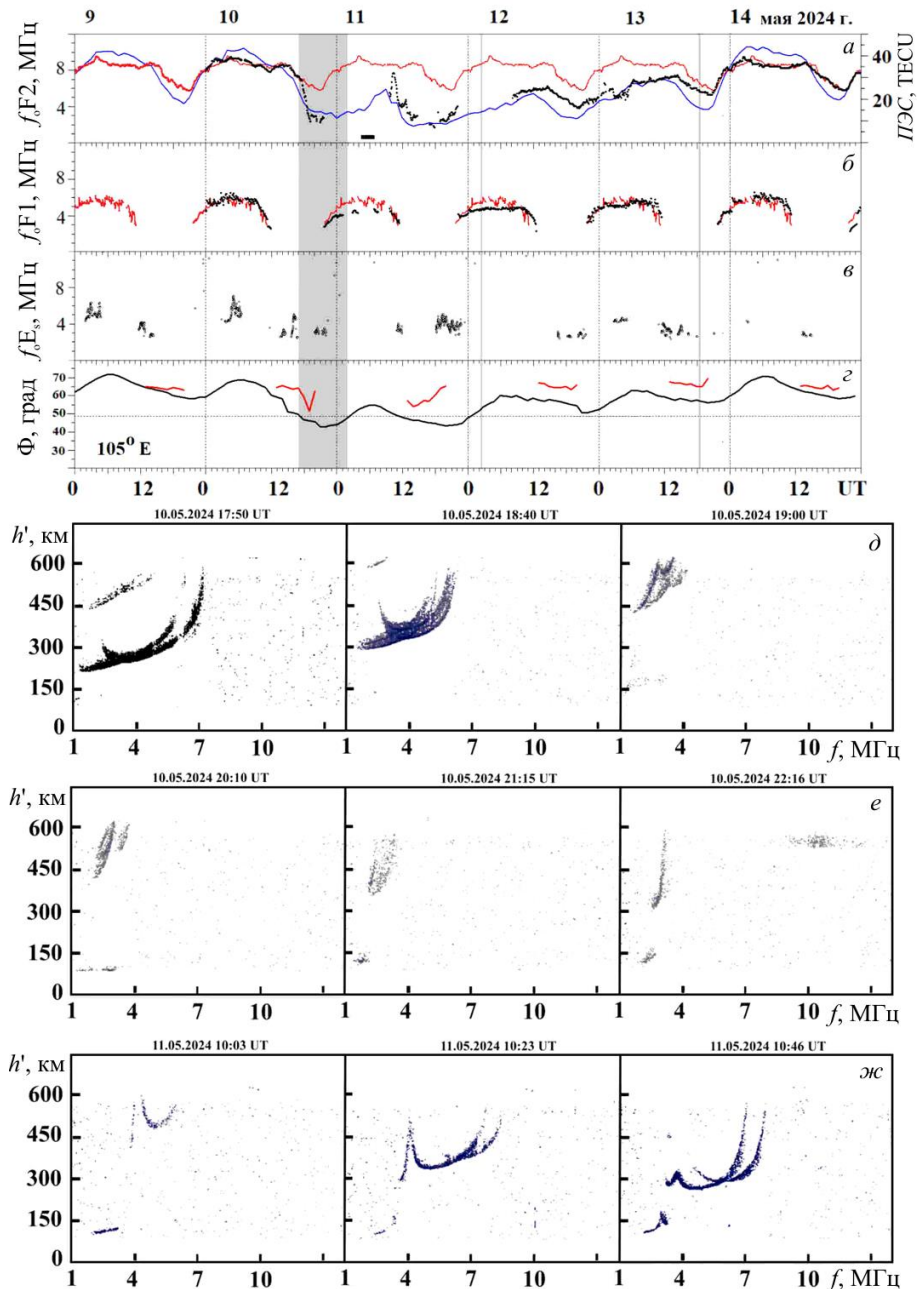


Рис. 5. Вариации f_oF2 и ПЭС (а), f_oF1 (б), f_oE_s (в), инвариантных широт дна ГИП и ГДВ на меридиане 105° E (г) для 9–14 мая 2024 г. и ионограммы ВЗ, полученные в пункте «Иркутск» 10–11 мая 2024 г. (д–ж). Обозначения те же, что на рис. 3. Черным прямоугольником отмечен интервал отсутствия измерений с 04:30 до 06:49 UT 11 мая 2024 г.

ионосферных структур, дающих отражения сигналов с почти постоянной задержкой. На ионограмме в 22:16 UT (см. рис. 5, е) такие отражения формируют почти горизонтальный трек.

В главную и восстановительную фазы бури на ст. «Иркутск», так же как на ст. «Новосибирск», был зарегистрирован G-эффект: $f_oF1 > f_oF2$. Он наблюдался в дневное местное время в течение трех часов 10–11 мая (в 22–01 UT) и в течение десяти часов 11–12 мая (в 22–08 UT).

В интервале 10:00–10:30 UT 11 мая на заходе Солнца на ионограммах ВЗ наблюдался сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума слоя F2 (см. рис. 5, ж). Как было отмечено выше, напряженность поля конвекции в этот

интервал времени резко уменьшилась до среднего уровня в невозмущенных условиях, а потом резко увеличилась (см. рис. 3, д).

На рис. 6 приведены ионограммы ВЗ с результатами восстановления ВЧХ $h'(f)$ и профиля плазменной частоты $f_c(h)$ [Grozov et al., 2012; Ponomarchuk et al., 2023], иллюстрирующие количественные изменения критической частоты и высоты максимума слоя F2 во время сумеречного эффекта.

В 09:00 UT 11 мая 2024 г. регистрировались сигналы, отраженные от слоев F1 и E (рис. 6, а). Критическая частота слоя F1 составляла 4.3 МГц, высота максимума слоя — 215 км. В интервале 09:39–09:44 UT отражения от F-области отсутствуют. Затем на ионограмме ВЗ вблизи верхней границы вертикального

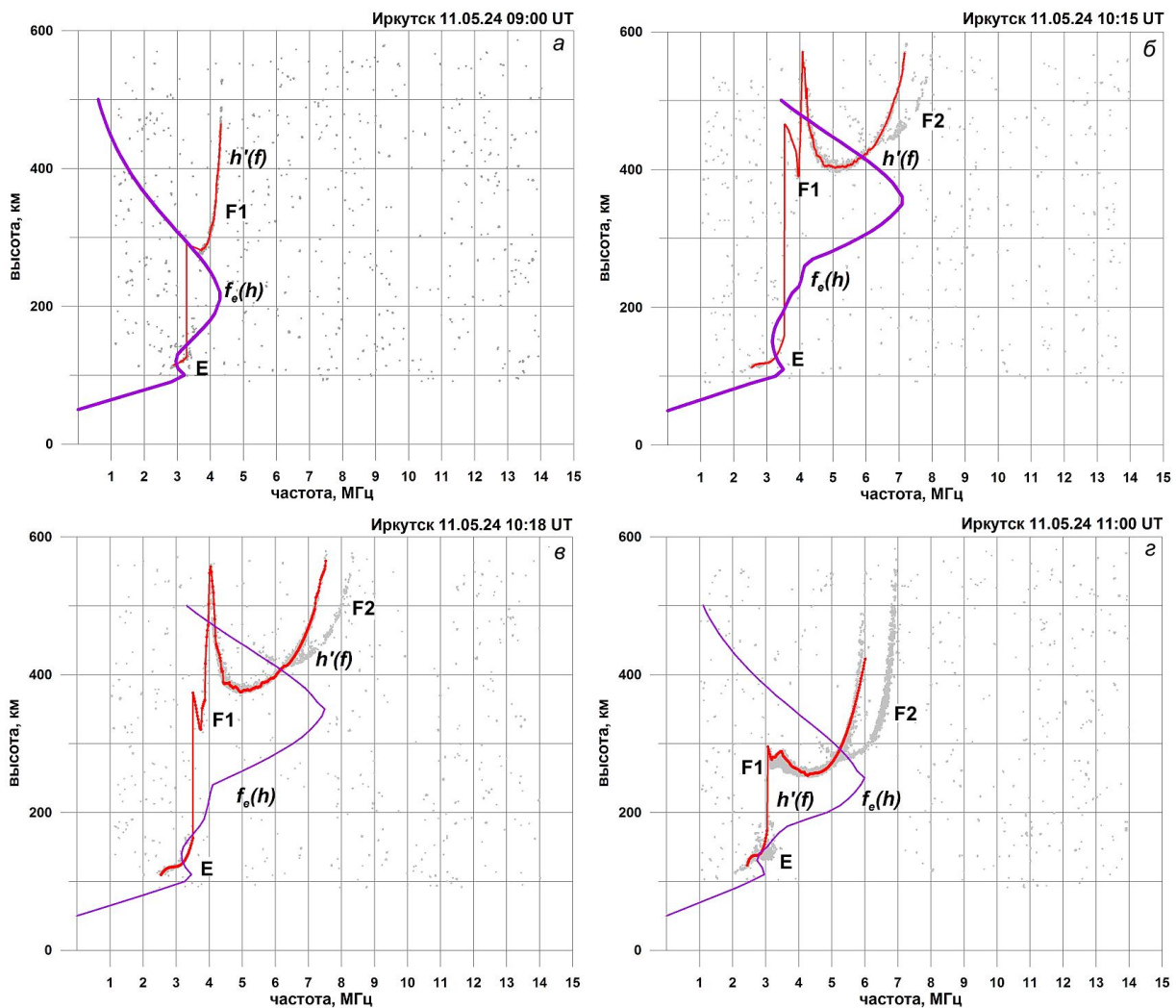


Рис. 6. Ионограммы ВЗ (серые точки), высотно-частотные характеристики $h'(f)$ (красные линии) и профили плазменной частоты $f_e(h)$ (бордовые линии): ст. «Иркутск», 11 мая 2024 г.

зондирования на ионозонде (600 км) появляется трек отраженных от F2-слоя сигналов, характеризующийся большой действующей высотой начала слоя. Сигналы, отраженные от слоя F1, на ионограмме отсутствуют либо слабо выражены. Таким образом, G-эффект отсутствует. С 10:03 UT наряду с отражениями от слоя F2 регистрируются сигналы, отраженные от слоя F1, и ВЧХ сигналов ВЗ имеет вид, как на ионограмме в 10:15 UT, приведенной на рис. 6, б. Критическая частота слоя F2 возрастает: $f_oF2 = 7.17$ МГц. Высота максимума слоя F2 также увеличивается: $h_mF2 = 350$ км. В 10:18 UT наблюдаются максимальные значения $f_oF2 = 7.52$ МГц, $h_mF2 = 354$ км. Затем критическая частота и высота максимума слоя F2 уменьшаются. В 11:00 UT $f_oF2 = 6.0$ МГц, $h_mF2 = 246$ км (см. рис. 6, з).

3.1.3. Особенности ионосферных возмущений по данным ВЗ

1. В главную и восстановительную фазы бури наблюдалось длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот F2-слоя. Экстремальное отклонение f_oF2 от фоновых значений составило

~75 %. При этом критические частоты слоя F1 уменьшились только 11 и 12 мая. Экстремальное отклонение f_oF1 от фоновых значений составило ~25 %.

2. В главную и восстановительную фазы бури наблюдались интервалы отсутствия отражений от F2-слоя ионосферы, связанные с низким электронным содержанием этого слоя и увеличенным поглощением радиоволн на низких частотах, близких к гирочастоте электронов, а также вследствие экранировки слоя F2 слоями F1 или E_s .

3. В главную и восстановительную фазы бури на ст. «Новосибирск» регистрировались слои E_s аврорального типа и протяженные косые E_s -слои, обусловленные высыпанием электронов на внутренней границе плазменного слоя. На ст. «Иркутск» регистрировались E_s -слои аврорального или запаздывающего типа.

4. В главную и восстановительную фазы бури 11 и 12 мая на обеих станциях наблюдался G-эффект в дневные часы местного времени, когда критическая частота F1-слоя превышала критическую частоту F2-слоя. Двенадцатого мая непрерывный интервал

наблюдения G-эффекта на ст. «Иркутск» составил 10 ч, на ст. «Новосибирск» — 8 ч.

5. На заходе Солнца 11 мая 2024 г. на ионограммах ВЗ обеих станций наблюдался сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума F2-слоя. В это время напряженность поля конвекции резко уменьшилась почти до ее среднего уровня в невозмущенных условиях, а потом резко увеличилась, что может быть причиной появления сумеречного эффекта.

3.2. Ионосферные возмущения по данным НЗ

На рис. 2 показана схема радиотрасс наклонного зондирования в Азиатском регионе России. Предварительные результаты анализа данных НЗ изложены в работе [Yasyukevich et al., 2025]. Установлено, что отрицательное ионосферное возмущение на главной и восстановительной фазах супербури вызвало значительное уменьшение максимальных наблюдаемых частот относительно их уровня в спокойных условиях и увеличение поглощения радиоволн, что в совокупности привело к ослаблению сигналов и регистрации длительных интервалов blackout. Ниже приведены результаты более детального исследования особенностей проявления магнитосферно-ионосферного взаимодействия в период магнитной бури 10–13 мая 2024 г. в данных НЗ.

3.2.1. Трасса Новосибирск—Иркутск

Первоначально рассмотрим трассу НЗ Новосибирск—Иркутск. Поскольку эта трасса имеет малую протяженность, основные особенности изменения параметров ионосферы в точках излучения и приема будут проявляться также в вариациях максимальных наблюдаемых частот модов распространения для сигналов, отраженных от ионосферных слоев E, F1, F2 и E_s.

На рис. 7 приведены вариации экспериментальных значений МНЧ модов распространения 1F2, 1F1, 2F2, 1E_s в возмущенных и спокойных условиях и ионограммы НЗ на трассе Новосибирск—Иркутск. Ионосферные возмущения в главную фазу бури проявились в условиях распространения радиоволн с 17:50 UT 10 мая, когда на ионограммах НЗ (рис. 7, д) было зарегистрировано F-рассеяние регулярных модов распространения 1F2 и 2F2. В это время поле магнитосферной конвекции резко возросло, что привело к смещению ГИП и зоны диффузных высыпаний электронов в области распространения и отражения сигналов НЗ на трассе Новосибирск—Иркутск (см. рис. 3, з и 5, з). Смещение ГИП привело к появлению на ионограммах НЗ наряду с сигналами регулярных модов распространения дополнительных диффузных сигналов, отраженных от полярной стенки ГИП. На ионограмме, полученной в 18:25 UT 10 мая (см. рис. 7, д), такие сигналы обозначены 1s и 2s.

Позднее регулярные моды распространения 1F2 и 2F2 на ионограммах исчезли из-за пониженной концентрации в F2-слое ионосферы и соответствующего увеличенного поглощения на низких частотах. Регистрировались сигналы, рассеянные от ионосферных неоднородностей в зоне диффузных высы-

паний вблизи полярной стенки ГИП, и сигналы, отраженные от E_s-слоя (см. ионограмму в 19:46 UT на рис. 7, д).

На ранней восстановительной фазе бури отражающая область ионосферы находилась в зоне ГИП, поэтому на ионограммах НЗ регистрировались слабые диффузные сигналы регулярных односкачковых модов распространения и сигналы, отраженные от плоского слоя E_s типа f (см. рис. 7, е).

Сумеречный эффект в ионосфере в 10–11 UT 11 мая (см. рис. 3, з и 5, ж), описанный в пунктах 3.1.1 и 3.1.2, также был зарегистрирован на ионограммах НЗ на трассе Новосибирск—Иркутск в виде увеличения МНЧ мода 1F2 относительно отрицательного возмущения (рис. 7, а). На ионограмме в 10:44 UT 11 мая (см. рис. 7, е) присутствуют сигналы, отраженные от F1- и F2-слоев.

G-эффект, наблюдавшийся на ст. «Новосибирск» и «Иркутск» (рис. 7, а, б), проявился на ионограммах НЗ в отсутствии сигналов, отраженных от F2-слоя, т. е. существовал только волноводный канал распространения, образованный земной поверхностью и слоем F1 [Пономарчук и др., 2024].

Изменение модовой структуры KB-сигналов на восстановительной фазе бури показывают ионограммы НЗ на рис. 7, ж. В 00:38 UT (в утренние часы местного времени) 12 мая 2024 г., когда наблюдался G-эффект на ст. «Новосибирск» и «Иркутск», регистрировались односкачковые моды 1F1 и 1E_s. В полуденные часы местного времени на ионограммах НЗ дополнительно регистрировались сигналы, отраженные однократно от слоя F2, а в вечерние часы — моды распространения 2F2 и 1E.

3.2.2. Магадан—Иркутск

На рис. 8 приведены вариации экспериментальных значений МНЧ модов распространения 1F2, 1F1, 2F2, 2E_s в возмущенных и спокойных условиях, вариации инвариантных широт дна ГИП и ГДВ на меридиане 120° Е и ионограммы НЗ на трассе Магадан—Иркутск. Горизонтальными пунктирными линиями на рис. 8, д отмечены инвариантные широты средних точек радиотрасс Магадан—Иркутск ($\Phi=53.39^\circ$) и Магадан—Новосибирск ($\Phi=57.77^\circ$) на высоте 250 км.

Как было отмечено выше, отрицательное ионосферное возмущение приводит к уменьшению критических частот отражающих слоев ионосферы в главную и восстановительную фазы бури, поэтому наблюдается значительное уменьшение максимальных наблюдаемых частот по сравнению со спокойными условиями. Поскольку уменьшение частоты регистрируемых сигналов приводит к увеличению поглощения радиоволн, в главную и восстановительную фазы бури регистрировались слабые сигналы и длительные интервалы blackout (рис. 8, а, б). Так же как на трассе Новосибирск—Иркутск, с 17:50 UT 10 мая на ионограммах НЗ на трассе Магадан—Иркутск были зарегистрированы слабые диффузные регулярные моды распространения 1F2 и 2F2 (рис. 8, е). Поле магнитосферной конвекции резко растет (см. рис. 3, д), что приводит к смещению ГИП и зоны диффузных высыпаний электронов в область распростра-

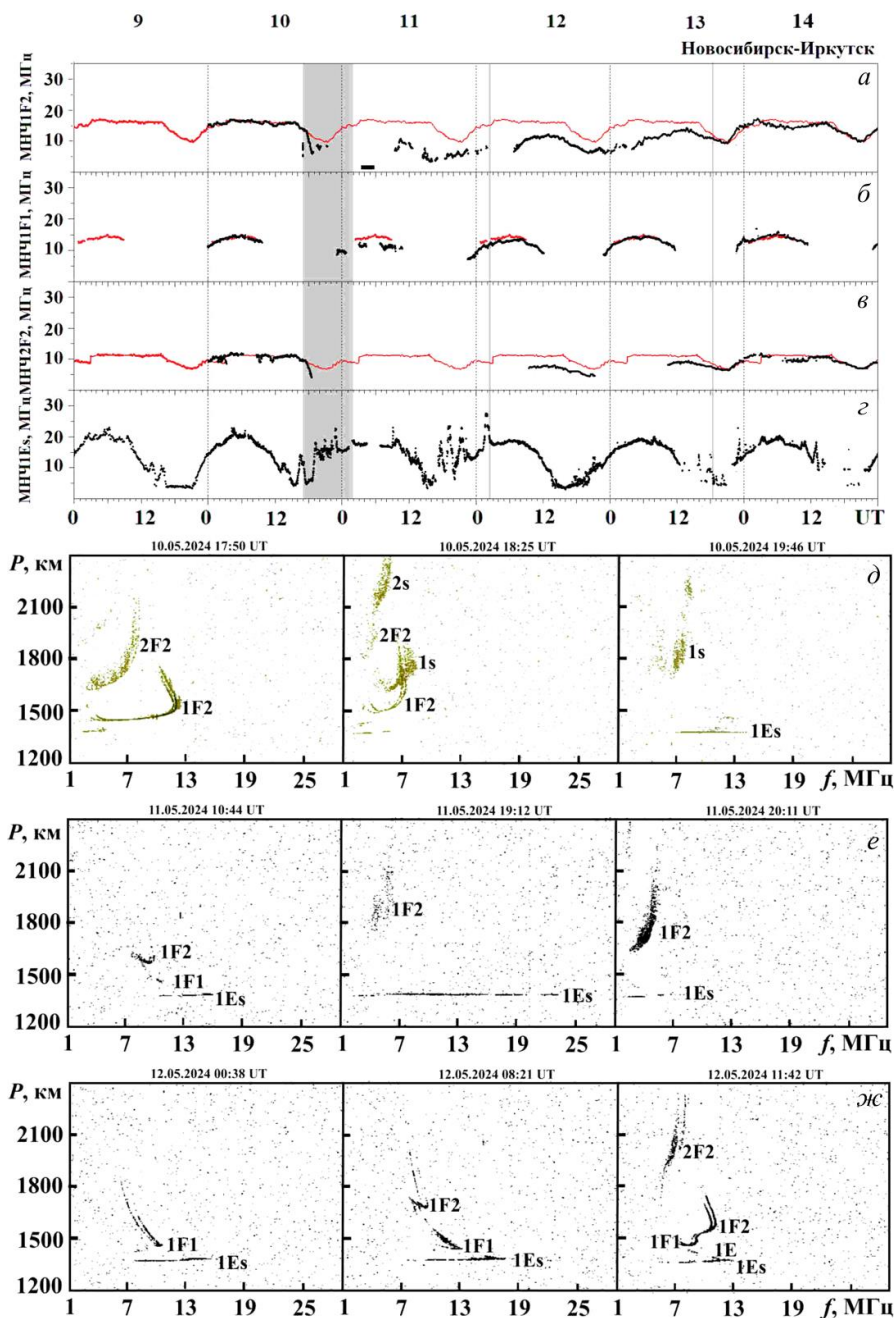


Рис. 7. Вариации экспериментальных значений МНЧ модов распространения 1F2, 1F1, 2F2, 1Es в возмущенных (черные точки) и спокойных (красная линия) условиях 9–14 мая 2024 г. (а–г) и ионограммы НЗ 10–12 мая 2024 г. на трассе Новосибирск—Иркутск (д–ж)

нения и отражения сигналов НЗ на трассе Магадан—Иркутск (рис. 8, д). Высоты отражения диффузных сигналов от F2-слоя увеличиваются, что видно на ионограмме в 18:20 UT на рис. 8, е. В вечерне-утренние часы местного времени 11 и 12 мая средняя (отражающая сигналы) часть радиотрассы находилась в зоне ГИП, поэтому длительные интервалы blackout чередовались с периодами регистрации сигналов, отраженных от слоев F1 и Es, как на ионограмме в 00:00 UT 11 мая 2024 г.

Г-эффект в данных НЗ на трассе Магадан—Иркутск проявился 11 и 12 мая в тех же интервалах времени, когда он регистрировался в данных ВЗ

на ст. «Иркутск» и НЗ на трассе Новосибирск—Иркутск (см. рис. 5 а, б и 8, а–в), что естественно, поскольку волноводный канал распространения сигналов путем отражения от слоя F2 в точке приема в эти часы отсутствовал: слой F1 экранировал слой F2 на трассе распространения [Пonomарчук и др., 2024].

На рис. 8, ж приведены ионограммы НЗ, иллюстрирующие изменение модовой структуры КВ-сигналов в переходные часы G-эффекта. В 09:35 UT (16:35 LT) на ионограмме наряду с модом распространения 1F1 присутствует мод 1F2. В 15:25 UT (22:25 LT) на ионограмме наблюдаются только моды распространения

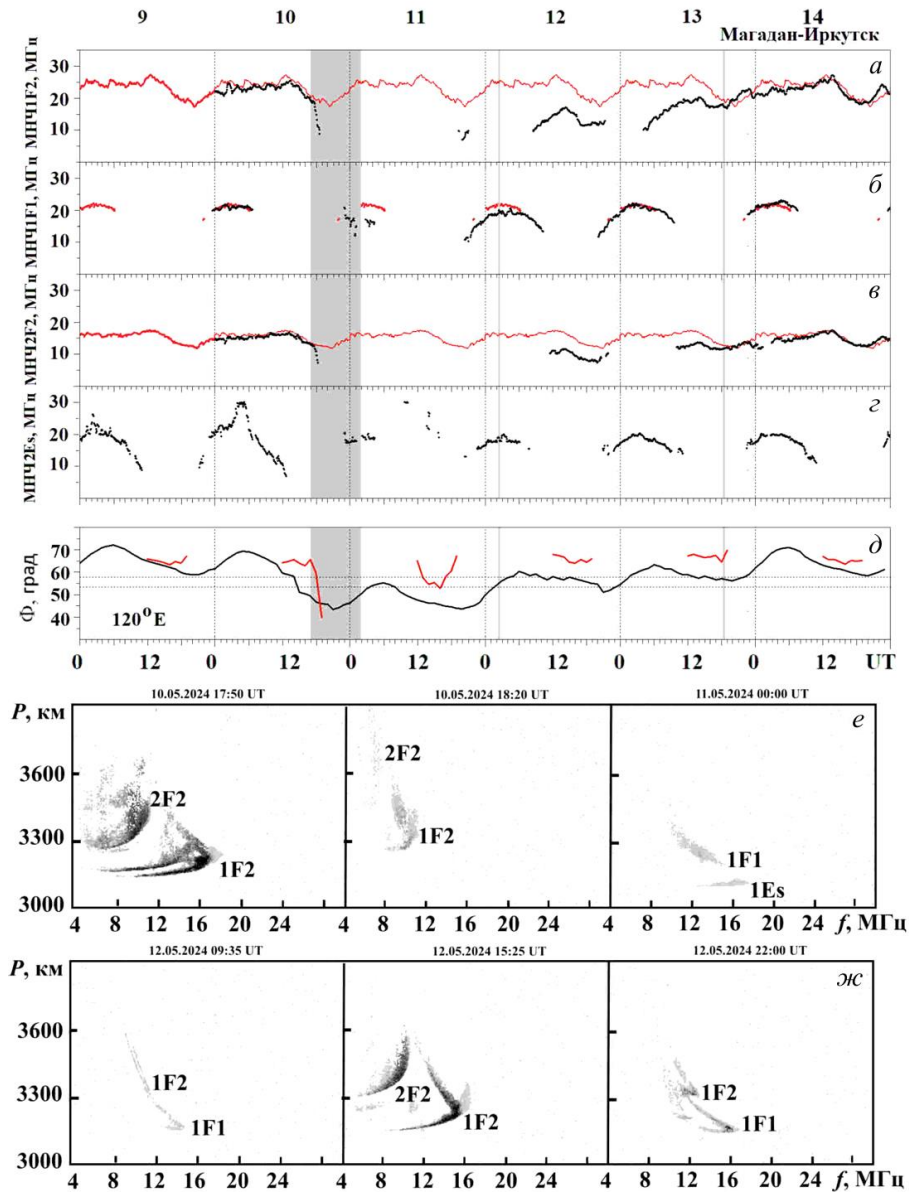


Рис. 8. Вариации экспериментальных значений МНЧ модов распространения 1F2, 1F1, 2F2, 2Es, в возмущенных (черные точки) и спокойных (красная линия) условиях (a–c); вариации инвариантных широт дна ГИП (черная линия) и ГДВ (красная линия) на меридиане 120° E (d) 9–14 мая 2024 г. и ионограммы N3 10–12 мая на трассе Магадан—Иркутск (e, ж)

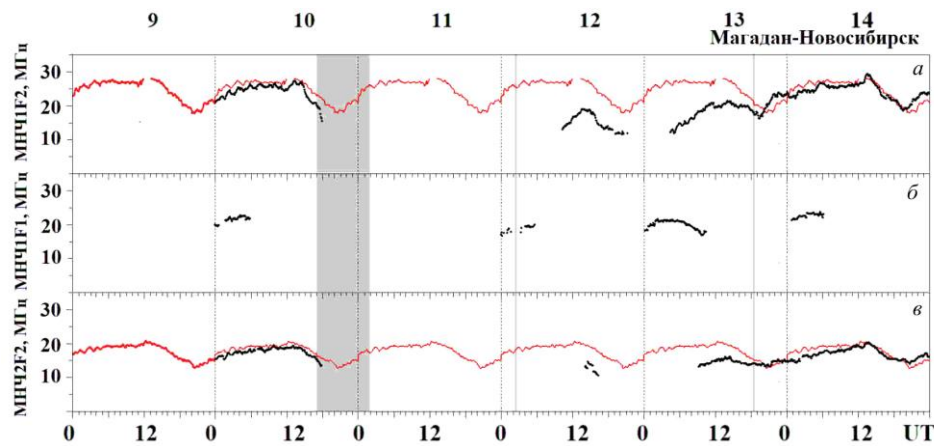


Рис. 9. Вариации экспериментальных значений МНЧ модов распространения 1F2 (a), 1F1 (б), 2F2 (в) 9–14 мая 2024 г. в возмущенных (черная точки) и спокойных (красная линия) условиях

1F2 и 2F2. В 22:00 UT (05:00 LT) на ионограмме зарегистрированы моды распространения 1F1 и 1F2.

3.2.3. Магадан—Новосибирск

В главную и восстановительную фазы супербури начальная часть радиотрассы вместе с пунктом излучения находилась в авроральной зоне, а средняя часть трассы (инвариантная широта средней точки $\Phi=57.77^\circ$) — в области ГИП. Уменьшение критических частот отражающих слоев ионосферы привело к значительному падению МНЧ по сравнению со спокойными условиями и к увеличению поглощения радиоволн, что в совокупности привело к ослаблению сигналов модов распространения 1F2, 1F1, 2F2 и продолжительным интервалам blackout (рис. 9, а–в). На этой трассе влияние G-эффекта наблюдалось только в 00:00–04:30 UT 13 мая.

3.2.4. Особенности ионосферных возмущений по данным НЗ

1. В главную и восстановительную фазы бури длительное отрицательное ионосферное возмущение вызвало уменьшение максимальных наблюдаемых частот относительно МНЧ в спокойных условиях и увеличение поглощения радиоволн, что в совокупности привело к ослаблению отраженных сигналов и регистрации длительных интервалов blackout.

2. В главную и восстановительную фазы бури усиление поля магнитосферной конвекции вызвало смещение ГИП и ГДВ на широты расположения отражающих областей радиотрасс и условия распространения радиоволн приблизились к субавроральным. Изменения характеристик распространения радиоволн на радиотрассах связаны с боковыми отражениями сигналов от полярной стенки ГИП и рассеянием радиоволн на ионосферных неоднородностях в зоне диффузных высыпаний электронов.

3. Периоды проявления G-эффекта в параметрах ионосферных слоев ($f_oF1 > f_oF2$) согласуются с интервалами регистрации сигналов, отраженных только от слоя F1, на ионограммах НЗ.

4. На трассе Новосибирск—Иркутск в данных НЗ вблизи 10–11 ч UT 11 мая было зарегистрировано проявление сумеречного эффекта в виде увеличения МНЧ мода 1F2 на фоне низких значений этого параметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы эффекты магнитной бури 10–13 мая 2024 г., проявившиеся в виде ионосферных возмущений, изменивших условия распространения КВ-радиоволн. Выявлены особенности проявления магнитосферно-ионосферного взаимодействия в данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. Анализ экспериментальных данных проводился с привлечением эмпирических моделей инвариантных широт дна ГИП и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний электронов с энергией ≥ 100 эВ и модели напряженности поля магнитосферной конвекции. Использовались также данные по пространственному

распределению ПЭС и данные спутников DMSP. Выявлены следующие особенности ионосферных возмущений, вызванных великой магнитной бурей.

1. В главную и восстановительную фазы бури длительное отрицательное ионосферное возмущение, проявившееся в значительном уменьшении критических частот слоя F2, вызвало уменьшение максимальных наблюдаемых частот на радиотрассах относительно их значений в спокойных условиях и увеличение поглощения радиоволн. Увеличение электрического поля магнитосферной конвекции в этот период привело к смещению главного ионосферного провала и зоны диффузных высыпаний электронов на широты станций ВЗ и приемо-передающих пунктов, а также средних (отражающих сигналы) областей радиотрасс. На ионограммах ВЗ и НЗ в вечерние и ночные часы регистрировались дополнительные диффузные сигналы, отраженные от полярной стенки ГИП. Наблюдалось длительное интервалы blackout.

2. В главную и раннюю восстановительную фазы бури наблюдались интервалы отсутствия отражений от F-области ионосферы вследствие экранировки слоем E_s и увеличенного поглощения на низких частотах, близких к гирочастоте электронов. На станции ВЗ в Новосибирске наблюдались E_s -слои аврорального типа и протяженные косые E_s -слои, обусловленные высыпанием электронов на внутренней границе плазменного слоя. На ст. «Иркутск» наблюдались E_s -слои аврорального и запаздывающего типов.

3. В восстановительную фазу бури на станциях ВЗ наблюдался G-эффект в дневное местное время, когда критическая частота F1-слоя превышала критическую частоту F2-слоя. На ионограммах наклонного зондирования G-эффект проявился в отсутствии сигналов, отраженных от слоя F2.

4. Одиннадцатого мая на ионограммах ВЗ зарегистрирован сумеречный эффект повышения электронной концентрации и высоты максимума слоя F2. На трассе НЗ Новосибирск—Иркутск сумеречный эффект проявился как увеличение МНЧ мода 1F2 на фоне ее пониженных значений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FWSE-2021-0002, FWZZ-2022-0019). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бенькова Н.П., Козлов Е.Ф., Коченова Н.А. и др. *Структура и динамика субавроральной ионосферы*. М.: Наука, 1993, 144 с.
- Беспрозванная А.С., Бенькова Н.П. Крупномасштабные структурные особенности слоя F2 в высоких широтах. *Proc. of International Symposium "Physical Processes in the Trough Region during Disturbances"*. Garzau, GDR (31.03-04.04.1987). Berlin, 1988, pp. 25–39.
- Гальперин Ю.И., Кранье Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной гра-

- ницы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуночном секторах. *Космические исследования*. 1977, т. 15, № 3, с. 421–434.
- Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018, т. 58, № 3, с. 366–373. DOI: [10.7868/S0016794018030070](https://doi.org/10.7868/S0016794018030070).
- Деминов М.Г., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Зависимость возникновения условия G в области F ионосферы от солнечной и геомагнитной активностей. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011, т. 51, № 5, с. 683–689.
- Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. *Физические процессы в полярной ионосфере*. М.: Наука, 1988, 232 с.
- Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полех Н.М. и др. Ионосферная обстановка в Восточно-Азиатском секторе во время геоактивного периода октябрь–ноябрь 2003 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2005, т. 45, № 1, с. 106–113.
- Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Смирнов В.Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования. *Солнечно-земная физика*. 2004, № 5, с. 124–127 / Kurkin V.I., Ponomarchuk S.N., Smirnov V.F. On the influence of the main ionospheric trough on the characteristics of HF signals on oblique sounding paths. *Sol.-Terr. Phys.* 2004, no. 5, pp. 124–127. (In Russian).
- Ларюнин О.А., Куркин В.И., Рыбкина А.А., Подлесный А.В. Определение скорости движения ионосферных возмущений по динамике U-образных треков на ионограммах. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2024, т. 64, № 2, с. 265–271. DOI: [10.31857/S0016794024020091](https://doi.org/10.31857/S0016794024020091).
- Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000, т. 42, № 10, с. 855–872.
- Нишида А. *Геомагнитный диагноз магнитосферы* / Перевод с англ. А.Е. Левитина; Под ред. Я.И. Фельдштейна. М.: Мир, 1980, 299 с.
- Павлов А.В. Колебательно-возбужденные N₂ и O₂ в верхней атмосфере. Обзор. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011, т. 51, № 2, с. 147–173.
- Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 года. Коллаборация «Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС-2003)». *Космические исследования*. 2004, т. 42, № 5, с. 509–554.
- Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013, вып. 4, с. 24–31.
- Пономарчук С.Н., Грозов В.П. Автоматическая интерпретация ионограмм наклонного зондирования на основе гибридных алгоритмов. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 2, с. 109–118. DOI: [10.12737/szf-102202410](https://doi.org/10.12737/szf-102202410) / Ponomarchuk S.N., Grozov V.P. Automatic interpretation of oblique sounding ionograms based on hybrid algorithms. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 2, pp. 102–110. DOI: [10.12737/stp-102202410](https://doi.org/10.12737/stp-102202410).
- Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А. Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 4, с. 91–105. DOI: [10.12737/szf-104202410](https://doi.org/10.12737/szf-104202410) / Ponomarchuk S.N., Zolotukhina N.A. Disturbances of ionospheric radio channel during magnetic storms in November–December 2023. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, no. 4, pp. 84–98. DOI: [10.12737/stp-104202410](https://doi.org/10.12737/stp-104202410).
- Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Ильин Н.В., Пензин М.С. Моделирование КВ-радиотрасс на основе волноводного подхода. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 2, с. 99–108. DOI: [10.12737/szf-102202409](https://doi.org/10.12737/szf-102202409) / Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Ilyin N.V., Penzin M.S. HF radio path modeling by waveguide approach. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, no. 2, pp. 93–101. DOI: [10.12737/stp-102202409](https://doi.org/10.12737/stp-102202409).
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм*. Перевод с английского. М.: Наука, 1977, 342 с.
- Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. *Магнитосфера Земли*. М.: Наука, 1980, 174 с.
- Тащилин А.В., Романова Е.Б. Роль магнитосферной конвекции и высыпаний в образовании «сумеречного эффекта» на главной фазе магнитной бури. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011, т. 51, № 4, с. 474–480.
- Урядов В.П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г. и др. Особенности распространения КВ-сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004, т. 47, № 12, с. 1041–1056.
- Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. II. Формирование и динамика полярного края субаврорального ионосферного провала в вечернем секторе. *Космические исследования*. 1977, т. 15, № 5, с. 708–723.
- Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., et al. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. *Rev. Geophys.* 2022, vol. 60, no. 4, p. e2022RG000792. DOI: [10.1029/2022RG000792](https://doi.org/10.1029/2022RG000792).
- Blanch E., Altadill D., Boska J., et al. November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 23, no. 9, pp. 3027–3034. DOI: [10.5194/angeo-23-3027-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-3027-2005).
- Buonsanto M.J. A case study of the ionospheric storm dusk effect. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1995, vol. 100, no. A12, pp. 23857–23869. DOI: [10.1029/95JA02697](https://doi.org/10.1029/95JA02697).
- Burke W.J., Huang C.Y., Marcos F.A., Wise J.O. Interplanetary control of thermospheric densities during large magnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, iss. 3, pp. 279–287. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.05.027](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.05.027).
- Collado-Villaverde A., Muñoz P., Cid C. Classifying and bounding geomagnetic storms based on the SYM-H and ASY-H indices. *Natural Hazards*. 2024, vol. 120, no. 2, pp. 1141–1162. DOI: [10.1007/s11069-023-06241-1](https://doi.org/10.1007/s11069-023-06241-1).
- Daglis I.A. The storm-time ring current. *Space Sci. Rev.* 2001, vol. 98, no. 3, pp. 343–363. DOI: [10.1023/A:1013873329054](https://doi.org/10.1023/A:1013873329054).
- Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Interplanetary conditions leading to superintense geomagnetic storms ($Dst \leq -250$ nT) during solar cycle 23. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, no. 6, L06S03. DOI: [10.1029/2007GL031755](https://doi.org/10.1029/2007GL031755).
- Fang X., Randall C.E., Lummerzheim D., et al. Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2008, vol. 113, A09311. DOI: [10.1029/2008JA013384](https://doi.org/10.1029/2008JA013384).
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1994, vol. 99, no. A4, pp. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).
- Grozov V.P., Ilyin N.V., Kotovich G.V., Ponomarchuk S.N. Software system for automatic interpretation of ionosphere sounding data. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2012, vol. 22, no. 3, pp. 458–463. DOI: [10.1134/S1054661812030042](https://doi.org/10.1134/S1054661812030042).
- Iyemori T., Rao D.R.K. Decay of the Dst field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, no. 11, pp. 608–618. DOI: [10.1007/s00585-996-0608-3](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0608-3).
- Kamide Y., Winningham J.D. A statistical study of the “instantaneous” nightside auroral oval: The equatorward boundary of electron precipitation as observed by the Isis 1 and 2 satellites. *J. Geophys. Res.* 1977, vol. 82, iss. 35, pp. 5573–5588. DOI: [10.1029/JA082i035p05573](https://doi.org/10.1029/JA082i035p05573).
- Kurkin V.I., Zolotukhina N.A., Ponomarchuk S.N., Oinats A.V., Ratovskii K.G. Specific features of ionospheric disturbances accompanying the magnetic storm of January 14–20, 2022. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024a, vol. 64, no. 6, pp. 869–880. DOI: [10.1134/S0016793224600784](https://doi.org/10.1134/S0016793224600784).

- Kurkin V.I., Medvedeva I.V., Podlesnyi A.V. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia. *Adv. Space Res.* 2024b, vol. 73, no. 7, pp. 3613–3623. DOI: [10.1016/j.asr.2023.09.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.020).
- Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, no. A7, pp. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).
- Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., et al. Extreme geomagnetic and optical disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 superstorm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 181, pp. 68–78. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.013).
- Möller H.G. Backscatter results from Lindau-II. The movement of curtains of intense irregularities in the polar F-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1974, vol. 36, no. 9, pp. 1487–1501. DOI: [10.1016/0021-9169\(74\)90227-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(74)90227-X).
- Pilkington G.R., Münch J.W., Braun H.J., Möller H.G. Comparison of ground HF backscatter and simultaneous particle and plasma pause measurements from a polar orbiting satellite. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1975, vol. 37, no. 2, pp. 337–347. DOI: [10.1016/0021-9169\(75\)90115-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(75)90115-4).
- Pirog O.M., Polekh N.M., Romanova E.B., et al. The main ionospheric trough in the East Asian region: Observation and modeling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009, vol. 71, no. 1, pp. 49–60. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.10.010).
- Polekh N.M., Ratovsky K.G., Deminov M.G., et al. Morphology of the G condition occurrence over Irkutsk. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 52, no. 4, pp. 575–580. DOI: [10.1016/j.asr.2013.04.013](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.013).
- Polekh N.M., Romanova T.B., Ratovsky K.G., et al. Studying the G condition occurrence in different latitudes under solar minimum: Observation and modeling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 130, no. 8, pp. 132–141. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.06.001).
- Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V. Technique of ionospheric parameters automatic determination from data of vertical sounding with a continuous chirp signal. *Proc. SPIE 12780: 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2023, 127806Q. DOI: [10.1117/12.2688438](https://doi.org/10.1117/12.2688438).
- Prölss G.W., Brace L.H., Mayr H.G., et al. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: A case study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1991, vol. 96, no. A2, pp. 1275–1288. DOI: [10.1029/90JA02326](https://doi.org/10.1029/90JA02326).
- Spogli L., Alberti T., Bagiacchi P., et al. The effects of the May 2024 Mother's Day superstorm over the Mediterranean sector: from data to public communication. *Ann. Geophys.* 2024, vol. 67, no. 2, PA218. DOI: [10.4401/ag-9117](https://doi.org/10.4401/ag-9117).
- Uryadov V.P., Ponyatov A.A., Vertogradov G.G., et al. Dynamics of the auroral oval during geomagnetic disturbances observed by oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian longitudinal sector. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2005, vol. 6, G11002. DOI: [10.1029/2004GI000078](https://doi.org/10.1029/2004GI000078).
- Yasyukevich Yu.A., Vasiliev R.V., Rubtsov A.V., et al. Extreme magnetic storm of May 10–19, 2024: Coupling between neutral and charged components of the upper atmosphere and the effect on radio systems. *Doklady Earth Sciences*. 2025, vol. 520, no. 33. DOI: [10.1134/S1028334X24604978](https://doi.org/10.1134/S1028334X24604978).
- Zhang Y., Paxton L.J. An empirical K_p -dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 8–9, pp. 1231–1242. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.03.008).
- URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 14 мая 2025 г.).
- URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 14 мая 2025 г.).
- URL: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data> (дата обращения 14 мая 2025 г.).
- URL: https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs (дата обращения 14 мая 2025 г.).
- URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html (дата обращения 14 мая 2025 г.).
- URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 14 мая 2025 г.).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 14 мая 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А., Куркин В.И., Белинская А.Ю., Грозов В.П., Ойнац А.В., Поддельский А.И., Подлесный А.В., Цедрик М.В. Эффекты магнитной бури 10–13 мая 2024 г. в азиатском регионе России по данным зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 17–32. DOI: [10.12737/szf-114202504](https://doi.org/10.12737/szf-114202504).