

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НАД РЕГИОНАМИ ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТ ЕВРАЗИИ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДОВ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2015 Г.

IONOSPHERIC RESPONSE OVER THE HIGH AND MIDDLE LATITUDE REGIONS OF EURASIA ACCORDING TO IONOSONDE DATA DURING THE SEVERE MAGNETIC STORM IN MARCH 2015

М.А. Черниговская 

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

К.Г. Ратовский 

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

Г.А. Жеребцов 

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

А.Г. Сетов

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

Д.С. Хабитуев 

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

А.С. Калишин 

*Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru*

А.Е. Степанов

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru*

А.Ю. Белинская

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

В.В. Бычков

*Институт космофизических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, vasily.v.bychkov@gmail.com*

С.А. Григорьева

*Институт геофизики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия, ion@arti.igfuran.ru*

В.А. Панченко

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Россия, panch@izmiran.ru*

M.A. Chernigovskaya

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

K.G. Ratovsky

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

G.A. Zherebtsov

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

A.G. Setov

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

D.S. Khabituev

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

A.S. Kalishin

*Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia, askalishin@aari.ru*

A.E. Stepanov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, a_e_stepanov@ikfia.sbras.ru*

A.Yu. Belinskaya

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

V.V. Bychkov

*Institute of Cosmophysical Researches
and Radio Wave Propagation of the FEB RAS,
Paratunka, Russia, vasily.v.bychkov@gmail.com*

S.A. Grigorieva

*Institute of Geophysics UB RAS,
Ekaterinburg, Russia, ion@arti.igfuran.ru*

V.A. Panchenko

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Russia, panch@izmiran.ru*

Аннотация. Проанализированы пространственно-временные вариации параметров ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии на основе анализа данных цепей высоко- и среднеширотных ионозондов в период сильной магнитной бури в марте 2015 г. Для анализа ионосферного отклика на экстремальное геомагнитное возмущение 24-го цикла солнечной активности использовались данные ионозондов о среднечасовых значениях критической частоты f_oF2 слоя F2 ионосферы, критической частоты спорадического слоя f_oE_s и минимальной частоты отра-

Abstract. We have analyzed spatial and temporal variations in ionospheric parameters over high and middle latitudes of Eurasia, using data from chains of high- and mid-latitude ionosondes during a severe magnetic storm in March 2015. To analyze the ionospheric response to the severe geomagnetic disturbance of solar cycle 24, we have employed ionosonde data on hourly average values of the critical frequency f_oF2 of the ionospheric F2 layer, the critical frequency of the sporadic layer f_oE_s , and the minimum reflection frequency f_{min} . There are strong latitudinal and longitudinal differences

жения f_{\min} . Отмечаются сильные широтные и долготные различия в особенностях временных вариаций анализируемых ионосферных параметров как в спокойных условиях до начала магнитной бури, так и во время ее развития. Обсуждаются возможные причины наблюдаемых пространственных вариаций ионосферных параметров. Источником пространственно-временных вариаций параметров ионизации ионосферы могут быть неоднородности, генерируемые в ионосфере высоких широт в условиях повышенной гелиогеомагнитной активности. На главной и восстановительной фазах магнитной бури наблюдались периоды блэкаутов радиосигналов ионозондов как на высоких, так и на средних широтах. В эти периоды отмечался существенный рост поглощения радиоволн, используемых при зондировании ионозондами, а также частоты появления экранирующих слоев E_s . Длительный эффект отрицательной ионосферной бури над регионами высоких и средних широт Европы объясняется перемещением области пониженного отношения концентраций $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы из региона Дальнего Востока и Сибири на запад к европейской территории на позднем периоде восстановительной фазы магнитной бури. Повышенная ионизация F2-области над обширным регионом Восточной, Западной Сибири и Восточной Европы после завершения магнитной бури в марте 2015 г. является проявлением эффекта последствия магнитных бурь. Особенно ярко рост ионизации проявился по данным измерений цепи среднеширотных ионозондов.

Ключевые слова: высоко- и среднеширотная ионосфера, цепь ионозондов, геомагнитная буря, вариации ионизации ионосферы, вариации состава термосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является логическим продолжением исследований пространственно-временных вариаций ионизации ионосферы Северного полушария в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях на основе данных цепей евразийских ионозондов, приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров сети INTERMAGNET [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. Для комплексного исследования пространственно-временных особенностей ионосферных неоднородностей на основе данных радиофизических измерений мы добавляем в анализ данные измерений цепи высокоширотных ионозондов, расположенных на широте Северного полярного круга (примерно 66.5°) и более высоких широтах Евразийского континента. Первый анализ долготно-временных вариаций максимума электронной концентрации над Евразийским континентом на основе анализа данных цепи высокоширотных ионозондов во время экстремальных магнитных бурь 24-го цикла солнечной активности в марте и июне 2015 г. проведен в работе [Черниговская и др., 2024].

between the features of temporal variations in the analyzed ionospheric parameters both under quiet conditions before the magnetic storm onset and during the storm. We discuss possible causes of the observed spatial variations in ionospheric parameters. The source of spatio-temporal variations in ionospheric ionization parameters may be inhomogeneities generated in the high-latitude ionosphere under conditions of increased heliogeomagnetic activity. During the magnetic storm main and recovery phases, periods of blackouts of radio signals from ionosondes were observed at both high and middle latitudes. During these periods, there was a significant increase in the absorption of radio waves used in ionosonde sounding, as well as in the frequency of occurrence of screening sporadic E_s layers. The long-term effect of the negative ionospheric storm over high and middle latitudes of Europe is explained by the movement of the vast region of the reduced density ratio $[O]/[N_2]$ at thermosphere heights from the Far East and Siberia westward to Europe during the late recovery phase of the magnetic storm. Increased ionization of the ionospheric F2 layer with f_oF2 exceeding the level for quiet days before the onset of the magnetic disturbance over the vast region of Eastern, Western Siberia and Eastern Europe after the end of the magnetic storm in March 2015 is a manifestation of the aftereffect of magnetic storms. The increase in ionization was especially pronounced, as measured by the chain of mid-latitude ionosondes.

Keywords: high- and mid-latitude ionosphere, ionosonde chain, geomagnetic storm, variations in ionosphere ionization, variations in thermosphere composition.

Совместный анализ данных измерений средне- и высокоширотной цепей ионозондов позволит исследовать глобальный характер пространственно-временных вариаций параметров ионосферы над регионом Евразии, проанализировать сходства и различия реакций средне- и высокоширотной ионосферы на изменения внешних (гелиогеомагнитная активность) и внутренних (вариации главного геомагнитного поля (ГМП)) факторов, влияющих на состояние ионосферной плазмы. Изучение временных вариаций долготно-широтных распределений параметров ионизации над анализируемым регионом Евразии даст возможность исследования динамики расширения и перемещения из высоких широт в средние ионосферных провалов ионизации в периоды магнитных бурь.

Предметом настоящего исследования являются вариации параметров, характеризующих состояние высоко- и среднеширотной ионосферы в условиях экстремальной магнитной бури 24-го цикла в марте 2015 г. В соответствии с классификацией [Hunsucker, Hargreaves, 2003], которая вводит разделение ионосферы на широтные зоны, имеющие существенно раз-

Таблица 1

Ионозонды высокоширотной цепи

Ионозонд	Тип ионозонда	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
Соданкюля	SO166	67° N	26° E	64° N	118° E
Ловозеро	CADI	68° N	35° E	64° N	126° E
Амдерма	CADI	70° N	61° E	63° N	147° E
Салехард	CADI	67° N	67° E	59° N	150° E
Норильск	DPS-4	69° N	88° E	60° N	166° E
Жиганск	DPS-4	67° N	123° E	58° N	169° W
Певек	CADI	71° N	171° E	65° N	135° W

ные свойства в зависимости от геомагнитной широты, под среднеширотной ионосферой мы понимаем область геомагнитных широт $30^\circ < Glat < 60^\circ$. К высокоширотной ионосфере относят область $Glat > 60^\circ$. Эта область включает примыкающую к ней со стороны средних широт субавроральную ионосферу ($55^\circ < Glat < 65^\circ$) [Мамруков и др., 2000], авроральную ионосферу ($65^\circ < Glat < 75^\circ$) и полярную шапку ($Glat > 75^\circ$).

Высокоширотная ионосфера имеет сложную пространственную структуру, обусловленную тесной взаимосвязью с магнитосферой Земли и процессами, протекающими в ней. Высыпания высокоэнергичных заряженных частиц из магнитосферы в ионосферу, интенсивные электрические поля и токи являются одними из основных механизмов формирования различных крупномасштабных структурных образований и неоднородностей в высокоширотной ионосфере. По данным наземного и спутникового зондирования ионосферы определены следующие структурные особенности высокоширотной ионосферы: ионосферные провалы ионизации (главный, узкий, кольцевой, высокоширотный и др.), полярный и авроральный пики ионизации, полярная полость, язык ионизации [Кринберг, Тащилин, 1984; Деминов, 2015; Туманова и др., 2016; Деминов, Шубин, 2018; Karpachev et al., 2019; Карпачев, 2019; Karpachev, 2021]. Все эти структурные образования имеют характерные пространственно-временные особенности формирования, зависят от гелиогеомагнитной активности, времени года, времени суток, географического положения точки наблюдения. Они наиболее отчетливо проявляются в зимних условиях или ночью даже в спокойных геомагнитных условиях. Летом, когда высокоширотная ионосфера освещена целые сутки (или большую часть суток) в условиях полярного дня, эти образования сглаживаются, либо отсутствуют вовсе. Провалы ионизации, локализованные в спокойных условиях в узких широтных областях, в условиях повышенной геомагнитной активности расширяются и смещаются в направлении средних широт. В области высоких широт индуцируются нейтральные ветры, которые перераспределяют нейтральный состав атмосферы по большей части региона высоких широт и части региона средних широт, что в итоге приводит к изменениям скоростей ионизации и рекомбина-

ции ионосферной плазмы. Кроме того, ветровые изменения сами по себе являются источниками ионосферных возмущений.

Включение в анализ области высокоширотной ионосферы, характеризующейся нестационарной и неоднородной структурой, имеет особое фундаментальное значение для понимания физики ионосферных процессов в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях, а также для практических задач обеспечения стабильной радиосвязи и навигации в полярных регионах.

ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа пространственно-временных вариаций ионосферных параметров в период экстремального геомагнитного возмущения в марте 2015 г. используются данные о среднечасовых (либо часовых — для ионозондов «Парус» с временным разрешением 1 ч) значениях f_oF_2 , f_oE_s и f_{min} по измерениям цепей средне- и высокоширотных евразийских ионозондов. Высокоширотная цепь состоит из семи ионозондов, расположенных на широтах $67^\circ - 71^\circ$ N (геомагнитные широты 58° N $< Glat < 65^\circ$ N) в долготном секторе $26^\circ - 171^\circ$ E Евразийского континента (рис. 1, а, красные метки и подписи; табл. 1). Цепь составляют ионозонды ИСЗФ СО РАН и ИКФИА СО РАН — DPS-4 в пунктах Норильск, Жиганск, а также ААНИИ Росгидромета — CADI [MacDougall et al., 1995; Выставной и др., 2013; Калишин и др., 2020] в пунктах Ловозеро, Амдерма, Салехард, Певек. Используются также данные ионозонда SO166 (Alpha Wolf) [Kozlovsky et al., 2013; Enell et al., 2016] Геофизической обсерватории Соданкюля (Финляндия). К сожалению, в период начальной и главной фаз бури в марте 2015 г. ионозонд в Амдерме не работал по техническим причинам. Его вновь ввели в эксплуатацию 21 марта в 13:55 UT на поздней восстановительной фазе магнитной бури.

Среднеширотную цепь составляют 8 ионозондов, расположенных в диапазоне широт $50^\circ - 60^\circ$ N (геомагнитные широты $42^\circ < Glat < 54^\circ$ N) в долготном секторе $13^\circ - 158^\circ$ E (см. рис. 1, а, белые метки и подписи; табл. 2). Цепь составляют ионозонды АИС (ИКИР ДВО РАН, Паратунка), два российских ионо-

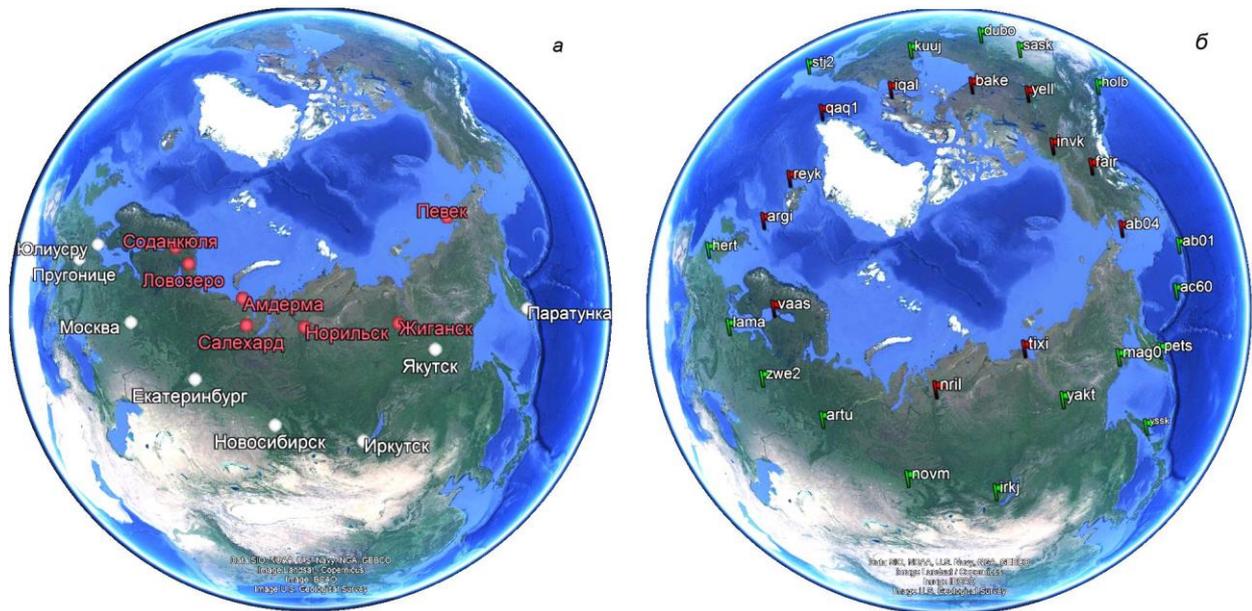


Рис. 1. Схемы расположения цепей ионозондов (а) и приемников GPS/ГЛОНАСС (б)

Таблица 2

Ионозонды среднеширотной цепи

Ионозонд	Тип ионозонда	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
Юлиусру	DPS-4D	55° N	13° E	54° N	99° E
Пругонице	DPS-4D	50° N	15° E	49° N	99° E
Москва	DPS-4	56° N	37° E	52° N	122° E
Екатеринбург	Parus 3.0	57° N	60° E	50° N	141° E
Новосибирск	Parus 1.0	55° N	83° E	50° N	160° E
Иркутск	DPS-4	52° N	104° E	42° N	177° E
Якутск	DPS-4	62° N	130° E	53° N	163° W
Паратунка	АИС	53° N	158° E	46° N	138° W

зонда «Парус» различных модификаций (ИНГГ СО РАН, Новосибирск; ИГФ УрО РАН, Екатеринбург) [Krashennnikov et al., 2010] и пять цифровых ионозондов DPS-4 различных модификаций (ИКФИА СО РАН Якутск; ИСЗФ СО РАН, Иркутск; ИЗМИРАН, Москва; Юлиусру, Пругонице) [Reinisch et al., 1997]. Перед началом магнитной бури 15–16 марта не работал ионозонд в Юлиусру.

По взаимному договору участников исследования все ионограммы на анализируемые даты обрабатывались вручную с целью минимизации возможных ошибок при автоматизированной обработке ионограмм. Как и в предыдущих исследованиях по данным измерений среднеширотной цепи ионозондов [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021], для анализа эффектов магнитной бури в вариациях максимума электронной концентрации используется критическая частота f_oF_2 , пропорциональная максимальной электронной концентрации F-области N_mF_2 [По-

ляков и др., 1968]. Временное разрешение для разных ионозондов варьирует от 15 мин до 1 ч (для ионозондов «Парус»). Пробелы во временных рядах измерений ионозондов заменялись линейной интерполяцией соседних доступных измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИОНИЗАЦИИ ВЫСОКО- И СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НАД ЕВРАЗИЕЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подробный анализ особенностей самой мощной по интенсивности магнитной бури 24-го цикла 17–19 марта 2015 г. приведен в работах [Черниговская и др., 2019, 2020, 2024; Chernigovskaya et al., 2021]. По классификации бурь по планетарному индексу Dst [Loewe, Prölss, 1997] эта буря относилась к очень

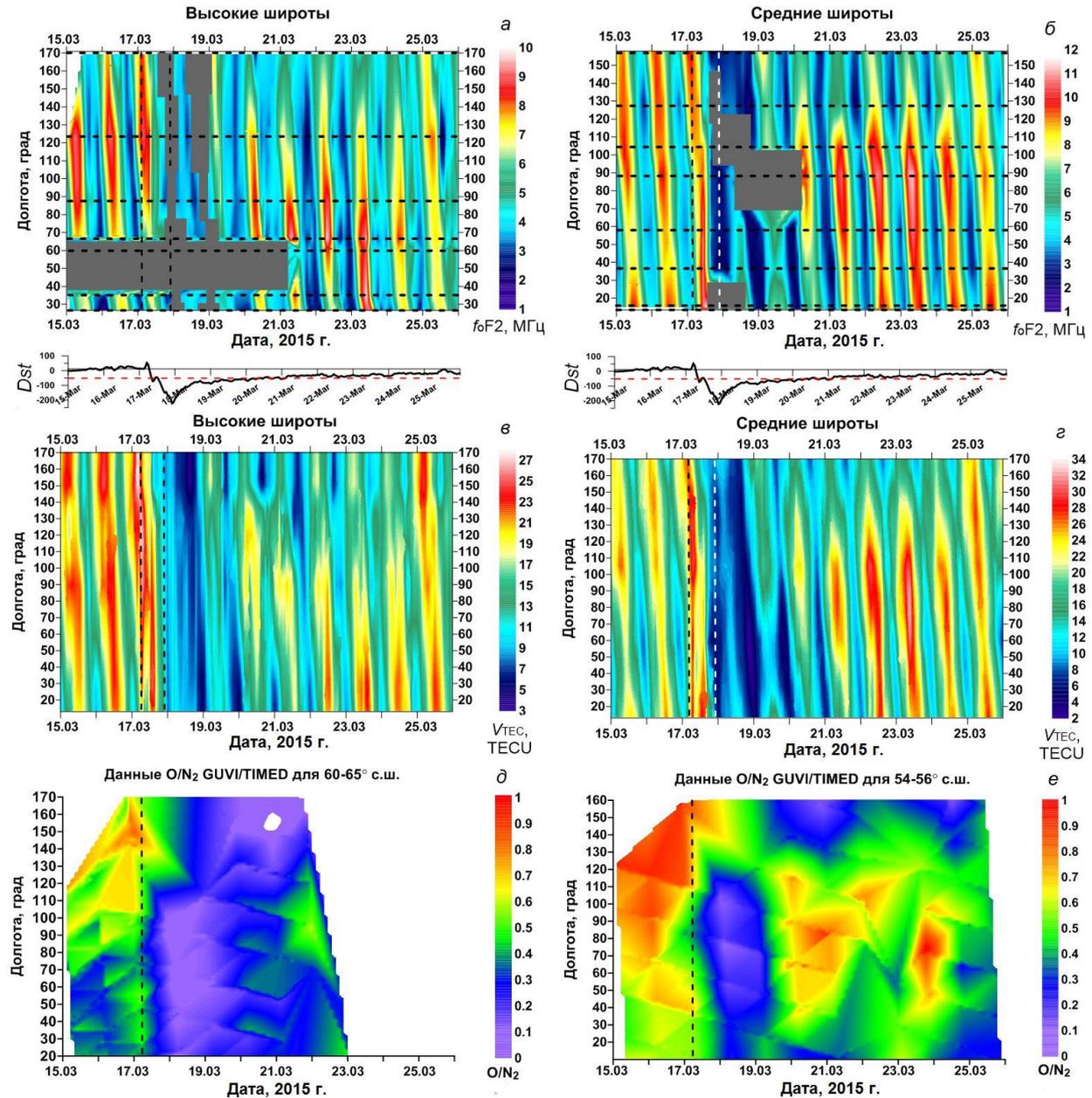


Рис. 2. Долготно-временные вариации f_oF2 по данным высоко- (а) и среднеширотной (б) цепей евразийских ионозондов; вариации ПЭС по данным высоко- (в) и среднеширотной (г) цепей приемников GPS/ГЛОНАСС [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021]; долготно-временные распределения $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED для высоких (д) и средних (е) широт в марте 2015 г. (UT)

сильным, экстремальным (severe) ($Dst < -200$ нТл). По классификации NASA на основе K_p -индекса буря относилась к классу G4 [<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>]. В момент максимальной интенсивности 17 марта в 22:47 UT Dst -индекс опустился до -223 нТл.

В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс сложных процессов (ионосферные бури), в результате которых существенно изменяются ее параметры. Во время геомагнитных возмущений f_oF2 может уменьшаться или увеличиваться по сравнению со спокойными условиями (соответственно отрицательные или положительные ионосферные бури) [Matsushita, 1959; Buonsanto, 1999; Mikhailov, 2000].

Верхние панели рис. 2 показывают долготно-временные вариации f_oF2 по данным измерений высоко- (а) и среднеширотной (б) цепей евразийских ионозондов для периодов 15–25 марта. Ниже показаны вариации Dst в период магнитной бури. Красная штриховая линия обозначает уровень, начиная с которого при $Dst \leq -50$ нТл условия геомагнитной возмущенности относят к буревым по классификации [Loewe, Pröls, 1997]. Вертикальные штриховые линии обозначают момент внезапного начала магнитной бури. Серыми прямоугольниками отмечены периоды отсутствия данных в результате технических причин или периодов блэкаутов радиосигналов ионозондов.

С включением в анализ данных измерений высокоширотной цепи евразийских ионозондов появи-

лась возможность сравнения долготно-временных вариаций N_mF2 над регионами высоких и средних широт Евразии (а, б) с подобными вариациями полного электронного содержания (ПЭС) (в, г), полученными по данным измерений на высоко- и среднеширотной цепях двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС (см. рис. 1, б) [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. Панели рис. 2, а–г показывают достаточно хорошее качественное согласие. Причины возможных расхождений подробно рассмотрены в работе [Перевалова и др., 2023; Черниговская и др., 2023]. Из анализа рис. 2 можно с уверенностью констатировать наличие долготных различий в вариациях N_mF2 и ПЭС в области как высоких широт (а, в) [Черниговская и др., 2024], так и средних (б, г) [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021].

При сравнении N_mF2 над Евразией в высоких (а, в) и средних (б, г) широтах, прежде всего обращают на себя внимание различия в общем уровне f_oF2 и величине суточных вариаций в спокойных условиях (до начала бури) в условиях равноденствия. Это объяснимо и понятно в связи с различием условий освещенности высоких и средних широт Северного полушария в весенний равноденственный сезон. С ростом магнитной возмущенности (в условиях развития ионосферной бури) изменчивость f_oF2 и ПЭС в высокоширотной ионосфере также меньше, чем в средних широтах, даже в случае такой экстремальной по интенсивности магнитной бури. Подобные эффекты в ионосфере на разных широтах отмечались в работе [Araujo-Pradere et al., 2005].

На рис. 3 дополнительно показаны для каждого ионозонда временные вариации f_oF2 по данным измерений высоко- (а) и среднеширотной (б) цепей евразийских ионозондов для периода 15–25 марта (точки на графиках). Вертикальные штриховые линии обозначают момент внезапного начала бури (S) и момент максимальной интенсивности магнитной бури (M) для вариаций Dst (нижние панели). Сплошными горизонтальными линиями показаны среднесуточные уровни f_oF2 , рассчитанные по 14 спокойным дням до момента начала бури. Периоды отсутствия данных измерений ионозондов соответствуют серым прямоугольникам на рис. 2, а, б.

Главная фаза бури продолжалась ~16.5 ч — с внезапного начала бури (SSC) в 06:23 UT (линии S на рис. 3) до 22:47 UT 17 марта. В максимуме бури Dst понизился до -223 нТл (линии M на рис. 3). После внезапного начала бури в первую половину суток 17 марта отмечался эффект положительной ионосферной бури по данным как ионозондов (см. рис. 2, а, б), так и приемников GPS/ГЛОНАСС (см. рис. 2, в, г). По данным ионозондов в Екатеринбурге, Москве, Пругонице, Юлиусру (рис. 2, б, 3, б), а также по данным ПЭС (рис. 2, г) особенно сильный рост электронной концентрации отмечался над среднеширотным регионом Европы. Со второй половины суток 17 марта начался резкий спад f_oF2 . По данным высокоширотных ионозондов в Певеке, Жиганске,

Салехарде отмечались полные блэкауты радиосигналов (рис. 2, а, 3, а). По данным высокоширотных ионозондов (рис. 2, а, 3, а) в Норильске, Ловозеро и Соданкюля с короткими промежутками блэкаутов на главной фазе бури 17 марта все же можно проследить суточный ход f_oF2 . По данным среднеширотных ионозондов (рис. 2, б, 3, б) со второй половины суток 17 марта отмечались полные блэкауты радиосигналов в Пругонице (на сутки), чуть позже и менее продолжительные — в Якутске и Иркутске. Уменьшение f_oF2 в средних широтах совпадает с минимумом Dst (рис. 2, б, г, 3, б), что связано с расширением зоны магнитосферной конвекции из высоких широт в средние. Движение плазмы под действием крупномасштабного электрического поля ($\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейф) приводит к опустошению части плазмосферы и смещению плазмопаузы к Земле, т. е. на меньшие L (L — расстояние до вершины силовой линии в радиусах Земли). Ионосферная плазма поднимается вверх, уменьшая электронную концентрацию и соответственно f_oF2 . Подобный сценарий развития ионосферной бури со сменой положительного и отрицательного эффектов является типичным для сезона равноденствия и особенно ярко проявляется в ионосфере средних широт [Burešová et al., 2007; Ratovsky et al., 2020].

После достижения максимальной интенсивности магнитной бури (линия M на рис. 3) на ранней восстановительной фазе отмечается дальнейшее уменьшение f_oF2 . Это хорошо видно по расположению точек на графиках вариаций относительно среднесуточного уровня f_oF2 в спокойных условиях (сплошные горизонтальные линии). В течение двух суток 18–19 марта регистрируемые значения f_oF2 были ниже среднесуточного уровня f_oF2 в спокойных условиях более чем на 2 МГц для ионозондов в Жиганске, Норильске (см. рис. 3, а). Для ионозондов в Салехарде, Ловозеро, Соданкюля 18–19 марта отмечались большие промежутки отсутствующих данных (рис. 3, а), поэтому невозможно установить, насколько изменились значения f_oF2 . Периоды полного блэкаута радиосигнала приходились на ночное время, когда высока вероятность формирования провалов ионизации (рис. 2, а, 3, а). Для самого высокоширотного ионозонда в Певеке период пониженных значений f_oF2 , а значит и N_mF2 , продолжался практически до 24 марта включительно с небольшим всплеском f_oF2 19 марта (см. рис. 3, а). Резкое падение электронной концентрации отмечено в высоких широтах и по данным вертикального ПЭС (см. рис. 2, в).

Развитие сильной отрицательной ионосферной бури на восстановительной фазе магнитной бури в период после 18 марта наблюдалось также по данным цепи среднеширотных ионозондов (рис. 2, б, 3, б) и приемников GPS/ГЛОНАСС (рис. 2, г). Резкое падение критических частот f_oF2 на 5 МГц и более относительно среднесуточного уровня f_oF2 в спокойных условиях отмечалось для ионозондов в Паратунке (до 24 марта включительно), Якутске (до 21 марта

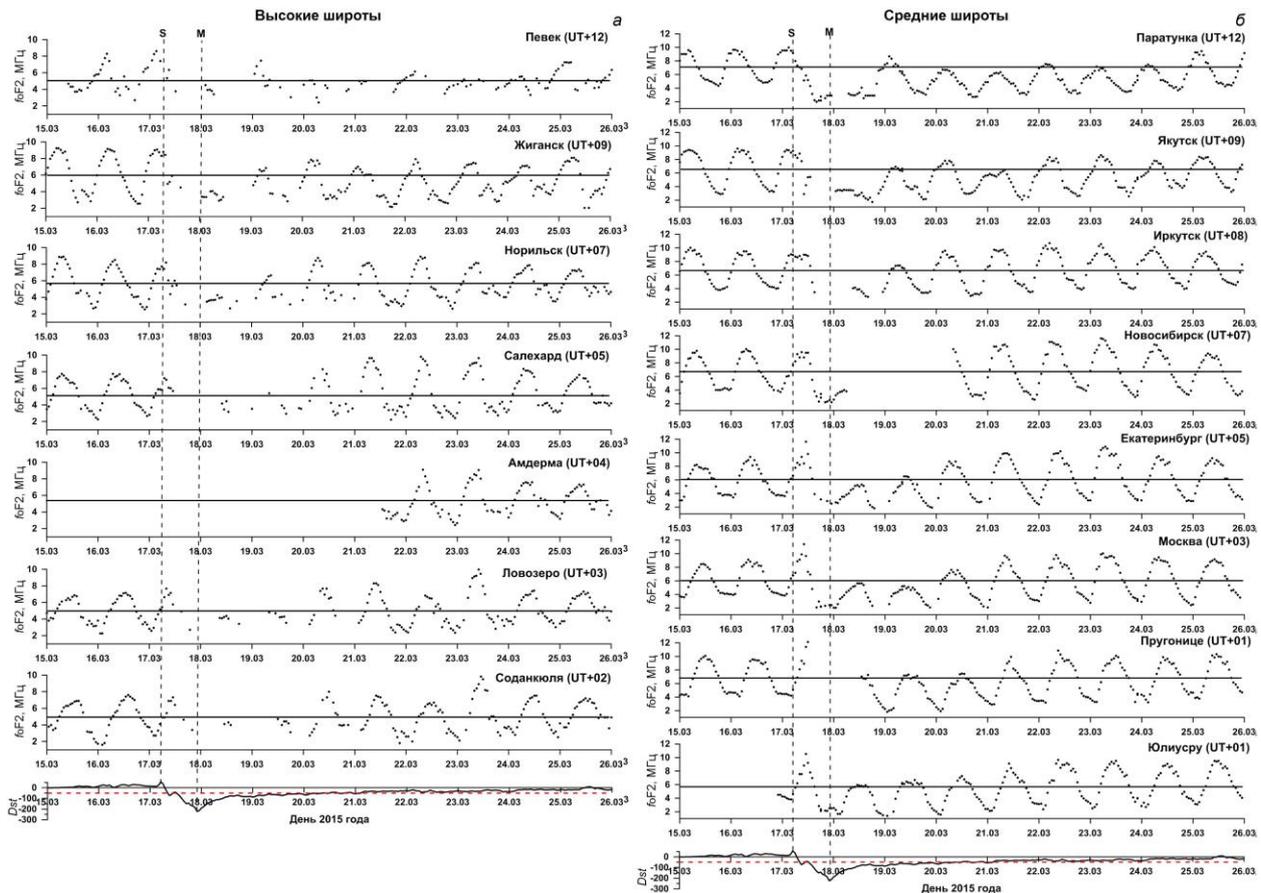


Рис. 3. Временные вариации f_oF2 (точки) по данным измерений ионозондов высоко- (а) и среднеширотной (б) цепей и вариации Dst (UT). Вертикальными штриховыми линиями показаны моменты начала бури (S) и момент максимума интенсивности (M). Сплошные горизонтальные линии — среднесуточные уровни f_oF2 в спокойных геомагнитных условиях

включительно), Иркутске, Екатеринбурге, Москве, Юлиусру (до 19 марта включительно), Пругонице (до 20 марта включительно). Ионозонд в Новосибирске вышел из рабочего состояния на двое суток с 18 по 20 марта. На ранней восстановительной фазе магнитной бури 18 марта (рис. 3, б) значения f_oF2 были очень низкими (2–4 МГц) на долготах 80° – 120° E над регионом Дальнего Востока и Сибири. Ионозонды в Новосибирске, Иркутске, Якутске, Паратунке оказались внутри аврорального ионосферного провала, южная граница которого сместилась глубоко в средние широты. На всех этих ионозондах регистрировались типичные авроральные ионограммы [Chernigovskaya et al., 2021]. С 20 марта дневная N_mF2 (рис. 2, б) и ПЭС (рис. 2, в) в сибирском долготном секторе (Новосибирск, Иркутск) начинали восстанавливаться до невозмущенных значений, тогда как над регионом Восточной Европы на долготах 30° – 60° E все еще наблюдались суточные вариации f_oF2 ниже среднесуточного уровня в спокойных условиях (рис. 3, б). Неожиданно в европейском секторе смещение южной границы аврорального провала ионизации на широты $\sim 55^\circ$ N произошло через 2–3 дня после достижения максимальной интенсивности магнитной бури 17 марта. К 20–21 марта область низкой электронной концентрации сместилась в европейский сектор, а в регионе

Сибири значения f_oF2 практически вернулись в невозмущенное состояние (рис. 2, б, в). На дальневосточных долготах 130° – 160° начавшая восстанавливаться 19 марта электронная концентрация ионосферы 20–21 марта вновь уменьшилась ниже уровня среднесуточной в спокойных условиях и сохранялась такой по данным ионозонда в Паратунке практически до 24 марта (рис. 3, б).

Для объяснения пространственно-временных вариаций ионосферных параметров в период бури на нижних панелях рис. 2 показаны долготно-временные распределения отношения концентраций $[O]/[N_2]$ в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~ 100 км для высокоширотного 60° – 65° N (рис. 2, д) и среднеширотного 54° – 56° N (рис. 2, е) регионов по спутниковым измерениям УФ-спектрометра GUVI TIMED [Christensen et al., 2003]. Распределение $[O]/[N_2]$ на рис. 2, д для высокоширотного региона доступно только до 22–23 марта до максимальной широты $\sim 65^\circ$ N, вероятно, в связи с особенностями наклона орбиты пролетов спутника TIMED. Физический параметр $[O]/[N_2]$ является хорошим индикатором отрицательных фаз ионосферных бурь [Prölls, Werner, 2002; Laštovička, 2002; Danilov, 2003; Liou et al., 2005]. Следствием понижения $[O]/[N_2]$ в термосферном газе является умень-

шение электронной концентрации в данной области. Сложные электродинамические процессы, протекающие в условиях повышенной геомагнитной активности в полярных широтах приводят к сильному уменьшению $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы. Сравнивая вариации f_oF2 в регионах высоких и средних широт восточного полушария над Евразией на высоте F2-слоя (рис. 2, а, б) и ПЭС ионосферы (рис. 2, в, г) с вариациями нейтрального состава на этих же широтах и долготах (рис. 2, д, е), можно отметить их достаточно высокую корреляцию. Долготно-временные распределения $[O]/[N_2]$ хорошо объясняют описанные ранее особенности отклика ионосферной плазмы на экстремальное геомагнитное возмущение: 1) наблюдавшееся длительное сильное понижение f_oF2 в ионосфере высоких и средних широт над регионом Дальнего Востока вплоть до 24 марта по данным ионозондов в Певеке (рис. 2, а, 3, а), Паратунке (рис. 2, б, 3, б) и ПЭС ионосферы (рис. 2, в, г); 2) восстановление электронной концентрации в ионосфере над высоко- и среднеширотными регионами Восточной и Западной Сибири начиная с 20 марта по данным ионозондов в Норильске, Салехарде (рис. 2, а и 3, а), Иркутске, Новосибирске (рис. 2, б и 3, б) и ПЭС ионосферы (рис. 2, в, г) раньше по сравнению с соседними долготными областями Дальнего Востока и Европы; 3) длительный эффект отрицательной ионосферной бури над европейскими высоко- и среднеширотными регионами вплоть до 21 марта, когда восстановительная фаза магнитной бури уже завершилась (см. вариации Dst на рис. 2 и 3). Обычно ГМП считается спокойным, когда $Dst > -20$ нТл.

Полное отсутствие на ионограммах следов отражений радиосигналов, генерируемых ионозондами, является результатом совместного действия механизмов падения электронной концентрации на высотах верхней ионосферы (отрицательные ионосферные бури являются доминирующим процессом в ионосферном отклике на усиление геомагнитной активности) и аномального увеличения поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы. Во время сильных возмущений, связанных с различными явлениями на Солнце и в земной магнитосфере, концентрация электронов в нижней ионосфере на высотах D-области (50–90 км) может возрастать в десятки и сотни раз в результате вторжения в ионосферу высоких широт энергичных частиц из магнитосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля, что приводит к резкому усилению поглощения радиоволн [Митра, 1977; Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Вследствие этого радиоволны средних и высоких частот, используемые при вертикальном зондировании (ВЗ) ионозондами, полностью поглощаются в нижних слоях ионосферы. Это явление называется блэкаутом и серьезно препятствует ионосферным наблюдениям традиционными методами, в частности, с помощью вертикального и наклонного радиозондирования. Параметр f_{min} часто используется как качественная характеристика поглощения радиоволн

в ионосфере [Митра, 1977]. Распространению радиоволн до высоты h_mF2 могут препятствовать также нерегулярные тонкие, имеющие толщину порядка нескольких километров слои с повышенной электронной концентрацией, возникающие на высотах E-области (90–140 км) — спорадические слои E_s . В высоких широтах, особенно во время магнитных возмущений [Благовещенский и др., 2017], эти слои появляются достаточно часто. Они могут оказывать существенное влияние на распространение радиоволн, блокируя вышележащие ионосферные слои. В сочетании с увеличением затухания в слое D во время геомагнитных возмущений это может привести к полному поглощению радиосигналов.

Поэтому для более детального анализа эффекта, оказываемого магнитной бурей на ионосферную электронную концентрацию, необходимо дополнительно рассматривать вариации параметра f_{min} (рис. 4, а, б, 5, а, б), характеризующего поглощение радиоволн на высотах нижней ионосферы в области D, а также параметра f_oE_s (рис. 4, в, г), характеризующего образование слоев E_s , экранирующих радиосигналы.

Рисунки 4, а, б, 5, а, б показывают пространственно-временные вариации параметра f_{min} — минимальной частоты, начиная с которой на ионограмме ВЗ виден след отражений от ионосферы. В целом, сравнивая временные вариации данных f_oF2 (рис. 3, а, б) и f_{min} (рис. 5, а, б), можно утверждать, что периоды отсутствия данных f_oF2 по измерениям ионозондов напрямую связаны с существенным возрастанием поглощения радиоволн в нижней ионосфере на главной и особенно на восстановительной фазах экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. Очевидны существенные различия характера временных (в том числе суточных) вариаций f_{min} для регионов высоких (рис. 4, а, 5, а) и средних широт (рис. 4, б, 5, б), а также существенные долготные вариации параметра f_{min} , регистрируемого ионозондами в одном широтном регионе, но на разных долготах.

Для региона высоких широт среднесуточный уровень f_{min} в спокойных условиях по данным измерений всех ионозондов составлял ~2 МГц с колебаниями ± 1 МГц в течение суток с максимумом утром или днем и минимумом ночью. В главную фазу магнитной бури 17 марта значения f_{min} возрастали до 4 МГц. Были периоды продолжительностью несколько часов 17–18 марта, когда наступало полное прерывание работы ионозондов в Певеке и Жиганске. Неожиданным стало то, что наиболее высокие значения f_{min} отмечались на восстановительной фазе магнитной бури (см. рис. 4, 5) по данным ионозондов в Жиганске ($f_{min}=6.2$ МГц утром 21 марта), Норильске ($f_{min}\sim 6$ МГц днем 20 марта, $f_{min}=6.4$ МГц утром 23 марта), Салехарде ($f_{min}=6$ МГц днем 21 марта), Ловозеро ($f_{min}\sim 6$ МГц утром 19 марта, днем 20 марта, $f_{min}=6.7$ МГц днем 21 марта), Соданкюля ($f_{min}\sim 6$ МГц днем 20 марта). Отметим, что в период после 20 марта Dst уже был выше бурового уровня (красная штриховая линия Dst на рис. 3, 5). Всплески f_{min} и соответст-

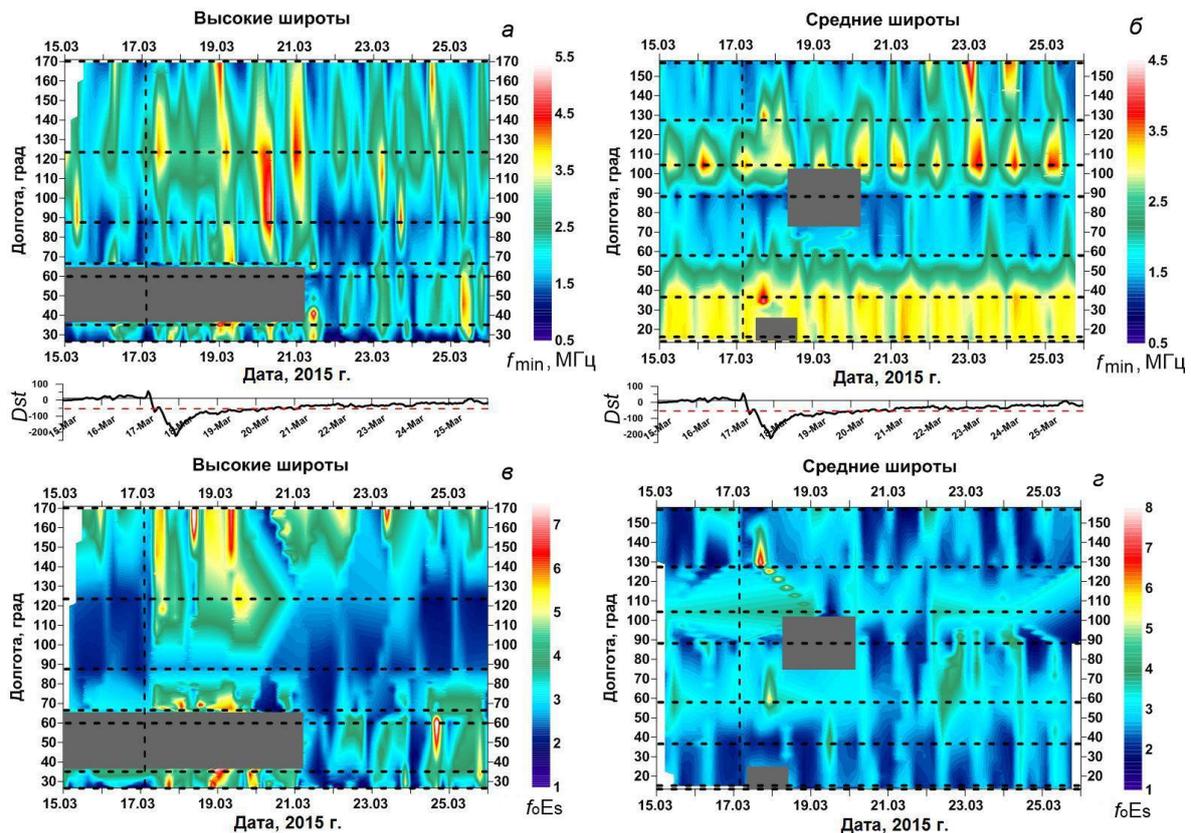


Рис. 4. Долготно-временные вариации параметров f_{\min} и f_oE_s по данным высоко- (а, в) и среднеширотной (б, г) цепей евразийских ионозондов в марте 2015 г. (время UT)

венно усиление поглощения радиоволн в нижней ионосфере могли быть связаны с изолированным всплеском магнитной возмущенности 22 марта примерно с 06 до 18 UT [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2024]. Рост активности был вызван воздействием на магнитосферу Земли высокоскоростного потока солнечного ветра из солнечной корональной дыры (CH HSS, coronal hole high-speed stream). Геомагнитные эффекты, связанные с событиями CH HSS, обычно незначительно влияют на вариации Dst , но хорошо видны в вариациях других геомагнитных индексов, особенно PCN , AE , A_p и K_p [Черниговская и др., 2024]. Все эти индексы вновь существенно возросли 22 марта. Рост AE указывает непосредственно на усиление магнитной возмущенности в полярной зоне, обусловленное усилением токов в ионосфере, протекающих вдоль границы аврорального овала. Подобное усиление электродинамических процессов на высотах D- и E-областей в авроральном, субавроральном, а также прилегающих к ним регионах средних широт, куда смещается в периоды повышенной геомагнитной активности экваториальная граница авроральных провалов ионизации, вполне может быть причиной наблюдаемых сильных вариаций ионосферных параметров нижней ионосферы.

Для региона средних широт среднесуточные уровни f_{\min} в спокойных условиях различаются для разных ионозондов. Для ионозондов в Паратунке, Якутске, Новосибирске, Екатеринбурге среднесуточный уровень f_{\min} составлял 1.6 ± 0.5 МГц; для ионо-

зондов в Москве, Пругонице, Юлиусру — 3 ± 0.5 МГц (рис. 4, б и 5, б). Особняком стоят данные измерений на ионозонде в Иркутске, где эта величина составляла 2.8 ± 1 МГц. Объяснить такие различия регистрируемых ионосферных параметров можно, во-первых, проявлением региональных долготных особенностей вариаций параметров нижней ионосферы в спокойных условиях; во-вторых, техническими различиями модификаций используемых ионозондов, а также, возможно, техники ручной обработки ионограмм ВЗ, к которым очень критичен анализируемый параметр f_{\min} .

Изменения f_{\min} в течение суток (рис. 5, б) аналогичны наблюдавшемуся характеру суточных вариаций в высоких широтах (рис. 5, а) — с максимумом утром или днем и минимумом ночью. С ростом геомагнитной возмущенности на главной фазе магнитной бури во вторую половину суток 17 марта значения f_{\min} существенно возросли даже в темное время суток до 3 и даже 5 МГц по данным ионозонда в Якутске, до 2.5 МГц в Екатеринбурге, до 4 МГц в Москве, до 3.5 МГц в Юлиусру. Были периоды продолжительностью несколько часов 17–18 марта, когда наступало полное прерывание работы ионозондов в Паратунке, Иркутске, Новосибирске (двое суток) и Пругонице (чуть более суток). Но наиболее высокие значения f_{\min} отмечались на восстановительной фазе магнитной бури (см. рис. 4, а, 5, б) 20–24 марта по данным ионозондов в Паратунке, 17–21 и 23–25 марта в Якутске, 17–19 марта в Екатеринбурге (рис. 5, б). В эти же периоды, как отмечалось выше, регистрировалось рез-

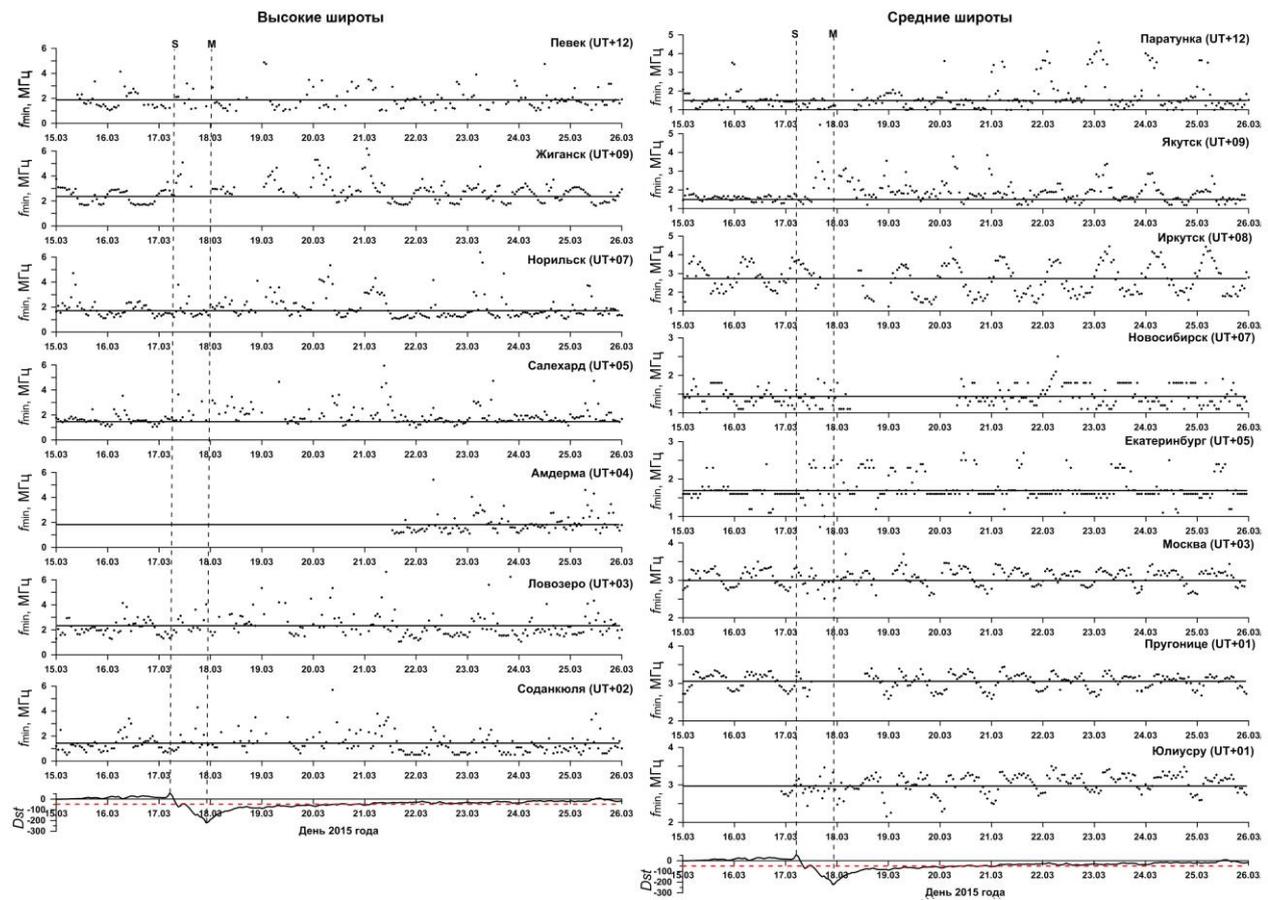


Рис. 5. То же, что на рис. 3 для f_{\min}

кое падение f_oF_2 на 5 МГц и более относительно среднесуточного уровня в спокойных условиях для ионозондов в Паратунке (до 24 марта включительно), Якутске (до 21 марта включительно), Екатеринбурге (до 19 марта включительно) (см. рис. 3, б).

В период анализируемой магнитной бури зарегистрирована высокая частота появления слоев E_s как в высоких (рис. 4, в), так и в средних (рис. 4, з) широтах. Существенное усиление (до 8–9 МГц) формирования слоев E_s в течение очень продолжительного периода, охватывающего не только главную и восстановительную фазы магнитной бури, но и последующий период вплоть до 25 марта, отмечено по данным самого высокоширотного ионозонда в Певеке. В главную и восстановительную фазы магнитной бури 17–19 марта также очень интенсивно формировались спорадические слои в E-области над высокоширотными регионами Жиганска, Салехарда, Ловозеро и Соданкюля (рис. 4, в), а также среднеширотными регионами Якутска и Екатеринбурга (рис. 4, з).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

По результатам предыдущих исследований [Черниговская и др., 2019, 2020, 2023; Chernigovskaya et al., 2021] причина наблюдавшейся долготной неоднородности ионизации ионосферы над Евразией была

впервые связана с нерегулярной структурой долготной изменчивости компонент ГМП, которая является следствием пространственных аномалий различных масштабов в фоновом главном магнитном поле Земли. На основе данных двух цепей магнитометров сети INTERMAGNET в средних и высоких широтах получены долготные распределения дисперсий H - и Z -компонент ГМП для рассматриваемого события магнитной бури в спокойных условиях до начала бури и возмущенных условиях в период развития бури [Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. В долготном распределении вариаций ГМП были выделены явно выраженные долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы. Максимальные долготные вариации дисперсий наблюдаются в большинстве случаев на средних широтах ($\sim 55^\circ N$). На высоких широтах ($\sim 70^\circ N$) изменчивость ГМП более равномерна по долготе. В магнитовозмущенные периоды в средних широтах восточного полушария над Евразией образуются две зоны сильных вариаций ГМП в долготных секторах вблизи $\sim 40^\circ$ и $\sim 130^\circ E$. Им соответствуют области сильных отрицательных возмущений ионосферы, т. е. понижения f_oF_2 , что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме F2-слоя. В секторе долгот 80° – $110^\circ E$ (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), симметричном рас-

положенному в западном полушарии геомагнитному полюсу, уровень вариаций ГМП всегда низкий. В связи с этим над регионом Евразии на долготах $\sim 80^\circ$ – 110° ионосфера имеет устойчивую положительную аномалию и раньше всего восстанавливается после геомагнитных возмущений (см. рис. 2, а, б).

Другая причина наблюдаемых долготных вариаций параметров ионосферы, особенно в области высоких широт, заключается в несовпадении магнитного и географического полюсов (так называемый UT-эффект) [Колесник, Голиков, 1982; Кринберг, Ташили, 1984; Деминов и др., 1992; Гололобов и др., 2014; Деминов, Шубин, 2018; Karpachev et al., 2019; Karpachev, 2021]. Амплитуда долготных вариаций электронной концентрации в области высоких широт может достигать порядка величины. Пространственная структура высокоширотной ионосферы тесно связана с магнитосферой и зависит от протекающих в ней процессов, таких как электрические поля и высыпание заряженные частицы. Эти процессы описываются в геомагнитной системе координат. Учет UT-эффекта приводит к тому, что области протекания магнитосферных процессов будут смещаться относительно терминатора в зависимости от мирового времени (UT). Например, магнитосферная конвекция, которая в разные моменты UT меняет местоположение относительно терминатора вследствие несовпадения оси вращения Земли с осью геомагнитного диполя, существенно влияет на пространственно-временное распределение электронной концентрации в ионосфере.

В субавроральных широтах несовпадение географической и геомагнитной осей приводит к ряду особенностей формирования структур ионосферных провалов ионизации [Колесник, Голиков, 1982; Деминов и др., 1992; Гололобов и др., 2014; Деминов, Шубин, 2018; Karpachev et al., 2019; Karpachev, 2021]. Это ярко выраженные сезонные различия, а также различия между западными и восточными долготными областями высокоширотной ионосферы, заключающиеся в том, что западные долготы Северного полушария расположены ближе к геомагнитному полюсу, чем восточные долготы. К примеру, главный ионосферный провал (ГИП), который наиболее отчетливо выражен в ночной F2-области зимой и представляет собой впадину в широтном распределении электронной концентрации, расположенную в области геомагнитных широт 50° – 70° N, проявляет долготную зависимость формирования пространственной неоднородности ионизации. Еще в работе [Колесник, Голиков, 1982] авторами показано, что в зимний период в восточном полушарии в случае несовпадения географического и геомагнитного полюсов в субавроральной ионосфере формируется область без эффективных источников ионизации, вследствие чего ГИП в восточном полушарии глубже, чем в западном. Провал проявляется круглосуточно в течение всей полярной ночи в отличие от западного полушария, где ГИП формируется только в ночное время.

Длительный эффект отрицательного ионосферного возмущения на восстановительной фазе магнитных бурь связан с возмущениями в виде термосферных

волн молекулярного газа [Черниговская и др., 2019, 2020, 2023, 2024; Chernigovskaya et al., 2021]. Эта волна формируется в нижней термосфере полярных широт в ночном секторе во время протекания сильной западной электроструи на главной фазе магнитной бури. За счет высокой частоты столкновений молекулярных ионов и нейтралов такая волна приобретает большой масштаб и импульс и перемещается в юго-западном направлении на большие расстояния даже при «выключении» магнитосферного источника в авроральных широтах.

Рост максимальной электронной концентрации (параметр f_oF2) на средних широтах Северного полушария над обширным регионом Сибири и Европы после 20 марта (рис. 2, б, з) с превышением уровня значений f_oF2 для спокойных дней (15–16 марта) перед началом магнитного возмущения можно рассматривать как проявление эффекта последствия магнитных бурь [Klimentko et al., 2018]. Этот эффект проявляется в формировании положительных возмущений электронной концентрации в дневное время через несколько дней после начала фазы восстановления магнитной бури. Основной причиной наблюдаемых положительных возмущений электронной концентрации, по мнению авторов [Klimentko et al., 2018; Ратовский и др., 2018], является увеличение концентрации атомарного кислорода за счет его переноса от экваториальных широт к средним на поздней восстановительной фазе. В свою очередь, этот перенос обусловлен дополнительным градиентом давления нейтрального газа от низких широт к высоким, возникающим в результате появления избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах в главную фазу геомагнитной бури за счет переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора. Авторы сравнивают с колебаниями маятника возмущение $[O]/[N_2]$ в период магнитной бури и после нее, равно как и возмущение электронной концентрации, которое переходит из отрицательной фазы в положительную в течение нескольких дней после начала фазы восстановления магнитной бури.

Этот эффект последствия особенно убедительно проявился по данным ионозондов в Иркутске, Новосибирске начиная с 20 марта (рис. 2, б, 3, б). Напомним, что эти ионозонды находятся в секторе долгот 80° – 110° E (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), уровень вариаций ГМП в котором всегда более низкий по сравнению с соседними долготными регионами. С 21–22 марта эффект последствия наблюдался и по данным европейских ионозондов в Екатеринбурге, Москве, Пругонице и Юлиусру (рис. 2, б, 3, б), а также по данным приемников GPS/ГЛОНАСС (рис. 2, з). Таким образом, эффекты в F-области на фазе восстановления магнитной бури в марте 2015 г. (сначала сильного понижения электронной концентрации с последующим ростом) наблюдались первоначально для ионозондов Дальневосточного и Восточно-Сибирского регионов, позднее — для европейских ионозондов. Такая временная последовательность проявления эффектов ионизации косвенно также свидетельствует о перемещении волны ионизации над Евразией с востока на запад.

ВЫВОДЫ

Исследование ионосферного отклика на экстремальную магнитную бурю в марте 2015 г. на основе анализа данных цепей ионозондов на высоких и средних широтах Северного полушария, а также спутниковых измерений GUVI TIMED отношения концентраций $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа на высотах выше ~100 км позволило сделать следующие выводы.

Совместное исследование долго-временных распределений f_oF_2 , f_oE_s и f_{min} по данным измерений ионозондов ВЗ с привлечением данных ПЭС по измерениям приемников GPS/ГЛОНАСС позволило выполнить комплексный анализ ионосферного отклика на разных высотных уровнях над Евразией для разных широт и долгот в период экстремального геомагнитного возмущения.

Ионосферная реакция на магнитную бурю в марте 2015 г. над регионами Евразии наблюдалась со сменной эффектом положительной ионосферной бури непосредственно после внезапного начала бури (SSC) 17 марта на эффект отрицательной ионосферной бури во вторую половину суток на главной фазе магнитной бури. Особенно ярко переход от роста максимальной электронной концентрации к резкому спаду проявился в ионосфере средних широт. Подобный сценарий развития ионосферной бури со сменой положительного и отрицательного эффектов является частым для равноденственного сезона.

На главной и восстановительной фазах магнитной бури наблюдались периоды блэкаутов радиосигналов ионозондов в высоких и средних широтах. Эти периоды полного отсутствия сигналов во время магнитных возмущений связаны с совместным действием механизмов падения электронной концентрации на высотах верхней ионосферы (отрицательные ионосферные бури), аномального увеличения поглощения радиоволн на высотах нижней ионосферы в результате вторжения в ионосферу высоких широт энергичных частиц из магнитосферы, а также образования экранирующих распространение радиосигналов спорадических слоев E_s . Например, для ионозондов в Салехарде, Ловозеро, Соданкюля 18–19 марта отмечались большие промежутки отсутствующих данных f_oF_2 . Периоды полного блэкаута радиосигнала приходились на ночное время, когда высока вероятность формирования провалов ионизации. В эти же дни наблюдался заметный рост параметра f_{min} , следовательно, поглощения радиоволн в D-области, а также частоты появления спорадических слоев E_s , препятствующих распространению вверх радиосигналов.

Отмечены большие широтные и долготные различия в особенностях временных вариаций анализируемых ионосферных параметров как в спокойных условиях до начала магнитной бури, так и во время ее развития.

Обращают на себя внимание различия в ионизации высоких и средних широт над Евразией в условиях равноденствия как в общем уровне ионизации,

так и в величине суточных вариаций в спокойных условиях (до начала бури). С ростом геомагнитной возмущенности в условиях развития ионосферной бури в высоких широтах отмечена сильная временная изменчивость максимума электронной концентрации (параметр f_oF_2). Но изменчивость f_oF_2 для высокоширотных ионозондов по сравнению со среднесуточными значениями f_oF_2 в спокойных условиях в относительном масштабе меньше, чем изменчивость f_oF_2 в средних широтах, даже в случае такой экстремальной по интенсивности магнитной бури.

Ионосферные параметры, полученные по данным ВЗ-ионозондов, расположенных примерно на одинаковых широтах, проявляют существенные долготные различия. Отмечен очень длительный период (практически до 24 марта) пониженных значений f_oF_2 , а значит и электронной концентрации на высоте максимума F2-слоя, и в то же время повышенных значений f_{min} и f_oE_s , свидетельствующих о повышенной электронной концентрации в нижней ионосфере на высоте D- и E-слоев по данным измерений самых восточных ионозондов: высокоширотного в Певеке и среднеширотного в Паратунке. Это свидетельствует о том, что вся толща ионосферы высоких и средних широт Дальневосточного региона находилась в возмущенном состоянии в течение главной и восстановительной фаз магнитной бури и еще несколько дней после окончания геомагнитного возмущения, хотя ионосфера в соседних западных регионах Восточной и Западной Сибири уже восстановилась до состояния спокойных дней. Изменчивость анализируемых параметров в этот временной интервал существенно отличалась от среднесуточного уровня в спокойных условиях. Весь ход суточных вариаций f_oF_2 располагался ниже уровня спокойных дней. Максимальные суточные (утренние или дневные) величины f_{min} превышали уровень спокойных дней примерно на 3 МГц (более чем в три раза) для региона среднеширотного ионозонда в Паратунке. По данным высокоширотного ионозонда в Певеке возрастание f_{min} было чуть меньше (примерно вдвое).

На фазе восстановления ионосферной ионизации важную роль в динамике ионосферы высоких, а особенно средних широт могут играть возмущения в виде термосферных волн молекулярного газа, распространяющихся в западном направлении в течение нескольких суток. Перемещением области пониженного отношения концентраций $[O]/[N_2]$ из региона Дальнего Востока и Сибири на запад к территории Европы объясняется длительный эффект отрицательной ионосферной бури над европейскими высоко- и среднеширотными областями вплоть до 22–23 марта, когда уже завершилась восстановительная фаза магнитной бури.

Рост электронной концентрации в ионосфере в дневное время на средних широтах Северного полушария над обширным регионом Сибири после 20 марта, чуть позднее над регионом Европы с повышением значений f_oF_2 для спокойных дней перед началом магнитного возмущения можно рассматривать как проявление эффекта последствия маг-

нитных бурь. Этот эффект особенно убедительно проявился по данным ионозондов в Иркутске, Новосибирске начиная с 20 марта, которые находятся в секторе долгот 80° – 110° Е (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), уровень вариаций ГМП в котором всегда более низкий по сравнению с соседними долготными регионами.

Учитывая выводы настоящего исследования, мы в очередной раз призываем к корректировке традиционного подхода к временному интервалу анализа ионосферных эффектов геомагнитных возмущений, когда анализ заканчивается при $Dst \geq -20$ нТл и магнитосферный источник возмущения уже «выключен», поскольку возмущения состава нейтрального газа, «запущенные» в процессе развития магнитной бури и приводящие в итоге к вариациям электронной концентрации в ионосфере, могут продолжаться еще несколько дней после окончания магнитной бури.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России; НИТР Росгидромета «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики»; Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWZZ-2022-0019); государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2). Экспериментальные данные получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>]; а также Северо-восточного гелиогеофизического центра ЦКП 558279, УНУ 351757 (ИКИР ДВО РАН).

Данные ионозондов в Соданкюля, Пругонице и Юлиусру были получены из Центра данных по солнечно-земной физике, Великобритания (UK Solar System Data Centre, [<https://www.ukssdc.ac.uk/>]).

Данные GUVI TIMED, использованные в данной работе, предоставлены при поддержке программы NASA MO&DA. Инструмент GUVI разработан и собран корпорацией Aerospace Corporation и Университетом Джонса Хопкинса (The Aerospace Corporation and The Johns Hopkins University). Научный руководитель — Ларри Дж. Пакстон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенский Д.В., Мальцева О.А., Анишин М.М., Рогов Д.Д. Спорадические слои E_s в высоких широтах во время магнитной бури 17 марта 2015 г. по данным вертикального и наклонного зондирования ионосферы. *Известия вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 6. С. 509–520.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988. 527 с.

Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда CAD1. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 4. С. 1–10.

Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Попов В.И. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов. *Вестник Северо-Восточного федерального университета*. 2014. Т. 11, № 2. С. 46–54.

Деминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы. В сб.: *Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75*. Москва, 2015. С. 295–346.

Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2018. Т. 58, № 3. С. 366–373. DOI: [10.7868/S0016794018030070](https://doi.org/10.7868/S0016794018030070).

Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В., Шмилауэр Я. Изменения положения главного ионосферного провала в зависимости от долготы и геомагнитной активности. *Геомагнетизм и аэрномия*. 1992. Т. 32, № 5. С. 185–188.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. ФГБУ «АНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах. *Вестник РФФИ. Антарктида и Арктика: Полярные исследования*. 2020. № 3–4 (107–108). С. 60–74. DOI: [10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78](https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78).

Карпачев А.Т. Модель ионосферного провала для дневных зимних условий по данным ИСЗ ИНТЕРКОСМОС-19 и CHAMP. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2019. Т. 59, № 4. С. 411–426. DOI: [10.1134/S0016794019040096](https://doi.org/10.1134/S0016794019040096).

Колесник А.Г., Голиков И.А. Трехмерная модель высокоширотной области F с учетом несовпадения географических и геомагнитных координат. *Геомагнетизм и аэрномия*. 1982. Т. 22, № 3. С. 435–439.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. *Ионосфера и плазмаосфера*. М.: Наука, 1984. 188 с.

Мамруков А.П., Халипов В.Л., Филиппов Л.Д. и др. Геофизическая информация по наклонным радиоотражениям в высоких широтах и их классификация. *Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца*. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. Вып. 111. С. 14–27.

Митра А. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли*. М.: Мир, 1977. 372 с.

Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Жеребцов Г.А., Ясюкевич А.С. Корреляция короткопериодных волновых возмущений максимальной электронной концентрации в слое F2 и полного электронного содержания в ионосфере. *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2023. Т. 513, № 1. С. 120–125. DOI: [10.31857/S2686739723601709](https://doi.org/10.31857/S2686739723601709).

Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. *Ионосферные процессы*. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 32–42. DOI: [10.12737/szf-44201804](https://doi.org/10.12737/szf-44201804).

Туманова Ю.С., Андреева Е.С., Нестеров И.А. Наблюдения ионосферного провала над Европой при разных уровнях геомагнитной возмущенности по данным радиотомографии. *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та*. 2016. № 3. 163906.

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С. и др. Долготные вариации ионосферных и геомагнитных параметров в Северном полушарии во время сильных магнитных бурь 2015 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 5. С. 336–347. DOI: [10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347).

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Ясюкевич А.С., Хабитуев Д.С. Ионосферная долготная изменчивость в Северном полушарии во время магнитных бурь по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 4. С. 269–281. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-4-269-281](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-269-281).

Черниговская М.А., Ясюкевич А.С., Хабитуев Д.С. Долготная изменчивость ионосферы Северного полушария во время магнитных бурь в марте 2012 года по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 108–112. DOI: [10.12737/szf-94202313](https://doi.org/10.12737/szf-94202313).

М.А. Черниговская, К.Г. Ратовский, Г.А. Жеребцов,
А.Г. Сетов, Д.С. Хабитуев, А.С. Калишин,
А.Е. Степанов, А.Ю. Белинская, В.В. Бычков,
С.А. Григорьева, В.А. Панченко

M.A. Chernigovskaya, K.G. Ratovsky, G.A. Zherebtsov,
A.G. Setov, D.S. Khabituev, A.S. Kalishin,
A.E. Stepanov, A.Yu. Belinskaya, V.V. Bychkov,
S.A. Grigorieva, V.A. Panchenko

Черниговская М.А., Сетов А.Г., Ратовский К.Г. и др. Изменчивость ионизации ионосферы над Евразией по данным цепи высокоширотных ионозондов во время экстремальных магнитных бурь 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10. С. 38–52. DOI: [10.12737/szf-102202404](https://doi.org/10.12737/szf-102202404).

Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Bilitza D. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity. *Radio Sci.* 2005. Vol. 40. RS5009. DOI: [10.1029/2004RS003179](https://doi.org/10.1029/2004RS003179).

Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 563–601.

Burešová D., Laštovička J., De Franceschi G. *Manifestation of Strong Geomagnetic Storms in the Ionosphere above Europe*. Space Weather. J. Lilensten (ed.), Springer. 2007. P. 185–202.

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., et al. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 67, no. 2. P. 762–776. DOI: [10.1016/j.asr.2020.10.028](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028).

Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S., et al. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) on the NASA TIMED satellite mission. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. A12. P. 1451. DOI: [10.1029/2003JA009918](https://doi.org/10.1029/2003JA009918).

Danilov A.D. Long-term trends of f_oF_2 independent on geomagnetic activity. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21, no. 5. P. 1167–1176.

Enell C.-F., Kozlovsky A., Turunen T., et al. Comparison between manual scaling and Autoscala automatic scaling applied to Sodankylä Geophysical Observatory ionograms. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2016. No. 5. P. 53–64. DOI: [10.5194/gi-5-53-2016](https://doi.org/10.5194/gi-5-53-2016).

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. *The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation*. Cambridge University Press, New York, 2003. 617 p.

Karpachev A.T. Dynamics of main and ring ionospheric troughs at the recovery phase of storms/substorms. *J. Geophys. Res.* 2021. Vol. 126. e2020JA028079. DOI: [10.1029/2020JA028079](https://doi.org/10.1029/2020JA028079).

Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position. *Adv. Space Res.* 2019. Vol. 63, iss. 2. P. 950–966. DOI: [10.1016/j.asr.2018.09.038](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.09.038).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., et al. Disturbances of the thermosphere–ionosphere–plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 180. P. 78–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).

Kozlovsky A., Turunen T., Ulich T. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 5265–5276.

Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde. *Computers & Geosciences*. 2010. Vol. 36. P. 628–635. DOI: [10.1016/j.cageo.2009.09.013](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.09.013).

Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 697–705. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00031-7).

Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., et al. Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. P. A05309. DOI: [10.1029/2004JA010840](https://doi.org/10.1029/2004JA010840).

Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. A7. P. 14,209–14,213.

MacDougall J.W., Grant I.F., Shen X. The Canadian advanced digital ionosonde: design and results. *WDC A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-104*, Boulder, Colorado, USA. 1995. P. 21–27.

Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959. Vol. 64, no. 3. P. 305–321. DOI: [10.1029/JZ064i003p0305](https://doi.org/10.1029/JZ064i003p0305).

Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms. *Física de la Tierra*. 2000. Vol. 12. P. 223–262.

Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A2. P. 1016. DOI: [10.1029/2001JA900126](https://doi.org/10.1029/2001JA900126).

Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., et al. Statistical analysis and interpretation of high-, mid- and low-latitude responses in regional electron content to geomagnetic storms. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, no. 12. P. 1308. DOI: [10.3390/atmos11121308](https://doi.org/10.3390/atmos11121308).

Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding support of OTH radar. *Radio Sci.* 1997. Vol. 32, no. 4. P. 1681–1694.

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 22 апреля 2024 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 22 апреля 2024 г.).

URL: <https://www.ukssdc.ac.uk> (дата обращения 22 апреля 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Жеребцов Г.А., Сетов А.Г., Хабитуев Д.С., Калишин А.С., Степанов А.Е., Белинская А.Ю., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А. Отклик ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии по данным ионозондов во время экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 4. С. 51–64. DOI: [10.12737/szf-104202406](https://doi.org/10.12737/szf-104202406).