

УДК 550.388.2
DOI: 10.12737/szf-84202204

Поступила в редакцию 04.08.2022
Принята к публикации 26.09.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА МАГНИТНЫЕ БУРИ В МАРТЕ 2012 г.

STUDYING THE RESPONSE OF THE MID-LATITUDE IONOSPHERE OF THE NORTHERN HEMISPHERE TO MAGNETIC STORMS IN MARCH 2012

М.А. Черниговская 

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

†Б.Г. Шпынев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия*

Д.С. Хабитуев

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

К.Г. Раговский

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

А.Ю. Белинская 

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

А.Е. Степанов

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

В.В. Бычков

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

С.А. Григорьева

*Институт геофизики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия, ion@arudaemon.gsras.ru*

В.А. Панченко

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

Й. Мелич

*Институт атмосферной физики им. Лейбница,
Кюльнсборн, Германия, melich@iap-kborn.de*

М.А. Chernigovskaya

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

†B.G. Shpynev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia*

D.S. Khabituev

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

K.G. Ratovsky

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

A.Yu. Belinskaya

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

A.E. Stepanov

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

V.V. Bychkov

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

S.A. Grigorieva

*Institute of Geophysics UB RAS,
Ekaterinburg, Russia, ion@arudaemon.gsras.ru*

V.A. Panchenko

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

J. Mielich

*Leibniz Institute of Atmospheric Physics,
Kühlungsborn, Germany, melich@iap-kborn.de*

Аннотация. Выполнено исследование вариаций ионосферных и геомагнитных параметров в Северном полушарии в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. на основе анализа данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов и средне- и высокоширотных цепей магнитометров сети INTERMAGNET. Подтверждены проявления долготной неоднородности ионосферных эффектов, связанной с нерегулярной структурой долготной изменчивости компонент геомагнитного поля. Подчеркнута сложная физика длительного магнито-возмущенного периода в марте 2012 г. с переключением между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури в один и тот же период магнитной бури для различных пространственных областей. Такие смены эффектов ионосфер-

Abstract. We have studied variations in ionospheric and geomagnetic parameters in the Northern Hemisphere during a series of magnetic storms in March 2012 by analyzing data from the Eurasian mid-latitude ionosonde chain, mid- and high-latitude chains of magnetometers of the global network INTERMAGNET. We have confirmed manifestations of the longitude inhomogeneity of ionospheric effects, which is associated with the irregular structure of the longitudinal variability of geomagnetic field components. The complex physics of the long magnetically disturbed period in March 2012 with switching between positive and negative phases of the ionospheric storm in the same period of the magnetic storm for different spatial regions is emphasized. The change in the effects of the ionospheric

ной бури могли быть связаны с суперпозицией в регионе средних широт конкурирующих процессов, влияющих на ионизацию ионосферы, источники которых находились в авроральной и экваториальной ионосфере. Проведено сравнение сценариев развития ионосферных возмущений в условиях равноденствия в периоды магнитных бурь в марте 2012, октябре 2016 и марте 2015 г.

Ключевые слова: цепь ионозондов; ионосферные возмущения; вариации геомагнитного поля; геомагнитная буря.

storm during this period might have been associated with the superposition in the mid-latitude region of the competing processes affecting the ionospheric ionization whose sources were in the auroral and equatorial ionosphere. We have compared the scenarios for the development of ionospheric disturbances under equinox conditions during magnetic storms in March 2012, October 2016, and March 2015.

Keywords: ionosonde chain; ionospheric disturbances; geomagnetic field variations; geomagnetic storm.

ВВЕДЕНИЕ

Причиной возмущений в ионосфере Земли часто является последовательность взаимосвязанных событий, начинающихся с процессов повышенной солнечной активности (солнечных вспышек, корональных выбросов массы, высокоскоростных потоков из корональных дыр), которые затем влияют на систему солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера. В других случаях ионосферные возмущения вызваны внутренними факторами ионосферы и термосферы, которые связаны с процессами в нижележащей нейтральной атмосфере. В обоих случаях возникают возмущения ионосферной ионизации различной интенсивности и разных пространственных и временных масштабов.

В условиях повышенной солнечной активности происходит резкое увеличение скорости солнечного ветра. Эффективный обмен энергией солнечного ветра с космической средой, окружающей Землю, приводит к серьезным изменениям в токах, полях и плазме магнитосферы. Как следствие, это вызывает значительные возмущения напряженности геомагнитного поля (ГМП) — геомагнитную бурю, являющуюся ярким проявлением гелиогеомагнитной активности [Dudok de Wit, Watermann, 2009]. Эффективными условиями передачи энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли являются длительные (от нескольких до многих часов) периоды высокоскоростного солнечного ветра и, что наиболее важно, направленная на юг и противоположная направлению ГМП V_z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП) на дневной стороне магнитосферы. Происходит пересоединение (слияние) силовых линий ММП с направленной на юг V_z -компонентой и открытых в полярных областях силовых линий ГМП. При этом в полярной шапке индуцируется сильное электрическое поле, направленное из утреннего в вечерний сектор (dawn-to-dusk electric field), которое может привести к резким изменениям в ионосфере Земли. Возмущенные электрические поля были идентифицированы авторами [Tsurutani et al., 2004] как (1) практически мгновенно появляющиеся зональные электрические поля быстрого проникновения (prompt penetration electric fields — PPEFs), часто наблюдаемые в экваториальных широтах; (2) электрические поля с задержкой, создаваемые возмущенным динамо в результате джоулева нагрева из-за поступления энергии в период магнитной бури в вы-

соких широтах, которые могут вызывать большие подъемы или нисходящие потоки ионосферной плазмы, приводящие к крупномасштабным увеличениям или уменьшениям ионизации и вертикального полного электронного содержания (ПЭС).

В результате интенсивного выделения энергии в магнитосфере и полярной ионосфере в периоды магнитных бурь существенно изменяются химические и динамические/электродинамические процессы в глобальной системе ионосфера—термосфера. Перераспределяются плотности ионосферной плазмы, газовый состав нейтральной термосферы и динамика среднеширотной, низкоширотной и экваториальной атмосферы и ионосферы [Blanc, Richmond, 1980].

Реакция ионосферы на магнитосферно-ионосферное взаимодействие во время магнитной бури известна как ионосферная буря [Hafstad, Tuve, 1929; Prölss, 1995; Prölss et al., 1991; Vuonsanto, 1999]. Ионосферные бури сопровождаются значительными вариациями критической частоты f_oF_2 F2-слоя ионосферы, которая пропорциональна пиковой электронной плотности F-области [Поляков и др., 1968]. Во время возмущенных условий f_oF_2 может увеличиваться, но чаще наблюдается ее резкое уменьшение по сравнению со значениями в спокойных условиях (соответственно, положительные или отрицательные ионосферные бури) [Matsushita, 1959]. Возникновение положительных и отрицательных эффектов ионосферных бурь сильно зависит от местного времени, сезона, географического региона [Prölss, 1995; Rishbeth, 1998; Vuonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Burešová et al., 2007]. Отрицательные ионосферные бури являются доминирующей характеристикой в ионосферном отклике на усиление геомагнитной активности и, как правило, объясняются изменениями нейтрального состава и смещением области главного ионосферного провала к экватору [Prölss, 1995; Rishbeth, 1998].

Положительные ионосферные бури обусловлены усилением направленных к экватору нейтральных ветров, возникающих в результате поступления энергии в авроральные широты в период магнитной бури [Prölss, 1995]. Во время положительных ионосферных бурь эффекты нейтральных ветров преобладают над изменением химического состава в средних широтах.

Другой причиной возникновения эффектов положительной ионосферной бури являются процессы в приэкваториальных широтах в периоды геомаг-

нитных бурь. В области экватора усиленный электрическими полями быстрого проникновения электродинамический дрейф $\vec{E} \times \vec{B}$ приводит к подъему ионосферной плазмы до высот 800–1000 км [Astafyeva, 2009]. Перенос плазмы из приэкваториальной области на большие высоты и в более высокие широты образует гигантский плазменный фонтан (дневной ионосферный суперфонтан) [Tsurutani et al., 2004]. Согласно [Danilov, 2013], электрические поля быстрого проникновения ответственны за положительные фазы ионосферных бурь, наблюдаемые в низких и средних широтах даже во время умеренных бурь. Эти поля маскируют эффекты отрицательных ионосферных бурь. Фотоионизация нижней F-области ионосферы производит «новую» плазму, которая возмещает поднятую вверх под действием дрейфа $\vec{E} \times \vec{B}$, что приводит к увеличению ПЭС — доминирующему эффекту в средних широтах.

Большинство исследований пространственных зависимостей ионосферных откликов на геомагнитную активность ограничено конкретным широтно-долготным регионом, хотя есть исследования глобального распределения электронной плотности [Mansilla, 2004; Astafyeva et al., 2015; Kunitsyn et al., 2016]. Многие из этих исследований выполнены с использованием спутниковых измерений атмосферных и ионосферных параметров. В развитии этих измерений в последнее время достигнут гигантский прогресс. Но есть и исследования с использованием экспериментальных данных сетей наземных радиопизических станций или комплексные исследования, сочетающие данные наземных и спутниковых измерений. Для изучения пространственно-временных вариаций ионосферных параметров наземными методами чаще используются экспериментальные данные измерений на меридиональных цепях инструментов. В таких случаях анализируются широтные распределения параметров ионосферы. Широтные вариации ионизации проявляются наиболее явно и ярко, объяснение их более очевидно, особенно в случае анализа влияния гелиогеомагнитных возмущений на состояние ионосферы. Долготные вариации в распределениях ионосферных параметров в спокойных и особенно в возмущенных геомагнитных условиях анализируются существенно реже [Mansilla, 2004; Dmitriev et al., 2013; Wang, Zhang, 2017; Li et al., 2018; Mansilla, Zossi, 2020]. Поэтому подобные исследования являются весьма актуальными. Особое значение имеет изучение физических механизмов, ответственных за формирование долготных эффектов в ионосфере.

На предыдущем этапе исследований на основе данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов, а также средне- и высокоширотных цепей приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров сети INTERMAGNET был впервые проведен анализ долготных особенностей отклика ионосферы на экстремальные магнитные бури в марте и июне 2015 г. [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021] и на сильную магнитную бурю в октябре 2016 г. [Черниговская и др., 2021]. Основная причина установленных долготных вари-

аций параметров ионосферы заключалась в конфигурации главного магнитного поля Земли, а также несовпадении магнитного и географического полюсов (так называемые УТ-вариации). В настоящей работе продолжен анализ ионосферных эффектов магнитных бурь с использованием отработанной методики анализа геомагнитных и ионосферных данных для серии магнитных бурь в марте 2012 г.

ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе для анализа отклика ионосферы на геомагнитную бурю используются: 1) данные о среднечасовых значениях критической частоты f_oF_2 и высоты максимума ионизации h_mF_2 слоя F2 ионосферы по измерениям цепи из семи среднеширотных ионозондов (рис. 1 и таблица); 2) данные о значениях H - и Z -компонент напряженности ГМП с одноминутным разрешением по измерениям на средне- и высокоширотной цепях магнитометров глобальной сети INTERMAGNET [<http://www.intermagnet.org>] (рис. 1).

Евразийскую цепь (белые кружки на рис. 1; таблица) составляли ионозонд АИС (Паратунка), два российских ионозонда «Парус» различных модификаций (Новосибирск, Екатеринбург) и четыре цифровых ионозонда DPS-4 различных модификаций (Якутск, Иркутск, Москва, Юлиусру). Временное разрешение для разных ионозондов варьируется от 15 мин до 1 ч (для ионозондов «Парус»). Старые модели ионозондов работают с меньшей мощностью передатчика, поэтому у них бывают перебои в периоды главной фазы сильных бурь. Пробелы во временных рядах измерений ионозондов заменялись линейной интерполяцией соседних доступных измерений.

Выполнялся анализ среднечасовых значений f_oF_2 и h_mF_2 . Помимо их значений для рассматриваемых бурь мы анализировали вариации абсолютных отклонений df_oF_2 и dh_mF_2 этих параметров от фонового



Рис. 1. Схема расположения цепи ионозондов (белые кружки) и цепей магнитометров (красные и голубые метки)

Станции среднеширотной цепи ионозондов

Станция	Тип ионозонда	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
		Широта	Долгота	Широта	Долгота
Юлиусру	DPS-4D	55° N	13° E	54° 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

уровня. Особенно это важно при анализе вариаций h_mF2 , чтобы исключить неоднозначность определения этого параметра на ионозондах разного типа. Фоновые величины вычислялись путем усреднения значений $f_oF2(t)$ и $h_mF2(t)$ скользящим средним на интервале сглаживания $(t-14, t+14)$ дней до и после каждого часа t текущего дня. Затем по временным рядам ежечасных исходных данных $f_oF2(t)$ и $h_mF2(t)$ рассчитывались ряды абсолютных отклонений $df_oF2(t)$ и $dh_mF2(t)$ от фонового уровня.

В период анализируемых магнитных возмущений отмечались непродолжительные временные интервалы отсутствия данных на ионозонде «Парус-3.0» в Екатеринбурге. Отсутствуют также данные ионозонда АИС в Паратунке для 19 марта 2012 г.

АНАЛИЗ ГЕЛИОГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ И ВАРИАЦИЙ ГМП

Анализируемый в настоящем исследовании период повышенной геомагнитной активности состоял из серии четырех магнитных бурь: 7, 9, 12 и 15 марта 2012 г. (соответственно события S1–S4 на рис. 2). Солнечная активность была высокой в течение 5–7, 9, 10 и 13, 14 марта в основном из-за серии продолжительных крупных солнечных вспышек X1.1 5 марта, X5.4 7 марта, M6.3 9 марта и M8.4 10 марта, M7.9 13 марта, M2.8 14 марта из активной области 1429 [Tsurutani et al., 2014]. Все вспышки были связаны с корональными выбросами массы (КВМ), направленными к Земле. В исследуемый период с 16 по 18 марта после события магнитной бури S4 отмечался высокоскоростной поток (coronal hole high-speed stream, CH HSS) из одной корональной дыры. Хорошо известно, что события CH HSS вызывают рост геомагнитной активности. Все четыре магнитные бури связаны с повышением скорости солнечного ветра, плотности и температуры плазмы, а также напряженности ММП. Высокие скорости солнечного ветра связаны с КВМ, направленными к Земле, и CH HSS.

Магнитная буря S1 началась 7 марта после прихода КВМ, связанного со вспышкой X1.1 5 марта. В максимуме бури 7 марта 2012 г. в 15:00 UT Dst понизился до -85 нТл, K_p возрастал до 6_+ , A_p достиг 80 нТл [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] (см. рис. 2). Магнитная буря 7–8 марта 2012 г. была умеренной согласно клас-

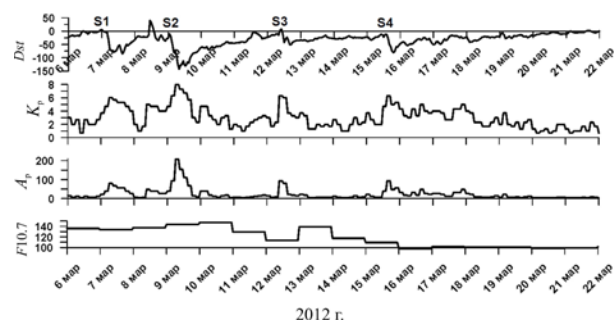


Рис. 2. Временные вариации индексов гелиогеомагнитной активности Dst , K_p , A_p , $F10.7$ в период серии магнитных бурь в марте 2012 г.

сификации по Dst [Loewe, Pröls, 1997]; по классификации NASA [<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>] буря относилась к классу G2 (умеренная).

Самой интенсивной из анализируемых была магнитная буря S2 9–11 марта 2012 г. Она связана со вспышкой X5.4 7 марта (самой мощной за исследуемый интервал) и сопутствующим КВМ, который достиг Земли спустя примерно два дня по данным NOAA SWPC (Space Weather Prediction Center) PRF 1906 (Preliminary Report and Forecast) от 13.03.2012 г. Геомагнитная активность увеличивалась от уровня слабой бури 8 марта до сильной 9 марта (класс G4) из-за устойчивого южного B_z ММП в сочетании с сохраняющимся эффектом КВМ. Активность снизилась до уровня слабой бури к 10 марта, по мере того как эффекты КВМ постепенно ослабевали. Возврат к спокойному уровню геомагнитной возмущенности произошел 11 марта. В максимуме бури 9 марта 2012 г. в 08:00 UT Dst понизился до -143 нТл, K_p возрастал до 6_+ , A_p достиг 207 нТл [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] (см. рис. 2).

Третья магнитная буря S3 началась 12 марта как следствие солнечных вспышек M6.3 9 марта, M8.4 10 марта и сопутствующих КВМ. В максимуме бури 12 марта 2012 г. в 16:00 UT Dst понизился до -51 нТл, K_p возрастал до 6_+ , A_p достиг 94 нТл [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] (см. рис. 2). Возврат к спокойному уровню геомагнитной возмущенности произошел 13, 14 марта. Магнитная буря 12–14 марта 2012 г. была умеренной (класс G2).

Четвертая магнитная буря S4 началась 15 марта после прихода КВМ, связанных со вспышками M7.9 13 марта, M2.8 14 марта. В максимуме бури 15 марта

2012 г. в 19:00 UT Dst понизился до -80 нТл, K_p возрос до 6.; A_p достиг 94 нТл [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] (см. рис. 2). Буря сопровождалась событием CH HSS, которое длилось с 16 по 18 марта после главной фазы магнитной бури S4, что привело к продлению фазы восстановления бури. Известно, что события CH HSS обычно слабо влияют на Dst , но отражаются в вариациях A_p и K_p (см. рис. 2). Магнитная буря 15–19 марта 2012 г. была умеренной (класс G2).

Индекс солнечной активности $F10.7$ в течение анализируемого периода изменялся от 147 до 100 (в ед. 10^{-22} Вт/($m^2 \cdot Гц$)) (см. рис. 2, нижняя панель).

В качестве основного параметра при анализе изменчивости ГМП используется дисперсия H - и Z -компонент напряженности ГМП (стандартное отклонение относительно фоновых невозмущенных значений). На основе данных двух цепей магнитометров сети INTERMAGNET в средних и высоких широтах (см. рис. 1) были получены долготные распределения дисперсий H - и Z -компонент напряженности ГМП для периодов рассматриваемых магнитных бурь в марте 2012 г., а также в спокойные дни до начала развития геомагнитных возмущений (рис. 3).

В долготном распределении вариаций ГМП, как и в наших предыдущих исследованиях, выделены явно выраженные долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы. В большинстве случаев максимальные неоднородности долготных вариаций дисперсий ГМП наблюдаются на средних широтах (вблизи $\sim 55^\circ N$) (рис. 3, *a*). Следует отметить, что для периода магнитных бурь 7–20 марта 2012 г. максимальные вариации компонент ГМП отмечались в западном полушарии в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи $\sim 270^\circ$ ($\sim 90^\circ W$ в географических координатах) и на долготах $\sim 225^\circ$ ($\sim 135^\circ W$) и $\sim 315^\circ$ ($\sim 45^\circ W$). В восточном полушарии в магнитовозмущенный период над Евразией наиболее выражено проявилась зона сильных вариаций ГМП на долготах $\sim 120^\circ$ – $140^\circ E$. В высоких широтах (вблизи $\sim 70^\circ N$) изменчивость ГМП более равномерна по долготе (рис. 3, *b*), но долготные неоднородности вариаций ГМП также проявляются.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЦЕПИ СРЕДНЕШИРОТНЫХ ИОНОЗОНДОВ

На рис. 4 показаны долготно-временные вариации параметров ионизации слоя F2 ионосферы по данным цепи из семи среднеширотных ионозондов. Вертикальными штриховыми линиями отмечены внезапные начала бурь (SSC) в марте 2012 г., вызванные воздействием межпланетных ударных волн на магнитосферу Земли. В анализируемый период равноденствия наблюдается ярко выраженный переход день — ночь в вариациях f_oF2 . Наклон суточных максимумов и минимумов параметров ионизации соответствует разнице в локальном времени приемных станций. Серым цветом показан период отсутствия данных измерений ионозонда АИС в Паратунке 19 марта 2012 г.

Непосредственно после SSC магнитной бури S1 7 марта наблюдалось значительное увеличение электронной концентрации в F-области ионосферы по дан-

ным дальневосточных ионозондов Паратунка, Якутск, (f_oF2 увеличилась на 2–3 МГц) (панель *b*). Критические частоты слоя F2 достигали значений ~ 9 МГц (панель *a*). Эффект положительной ионосферной бури над регионом Дальнего Востока отмечался на главной фазе магнитной бури. На фазе восстановления реакция ионизации на геомагнитное возмущение над Паратункой и Якутском сменилась эффектом отрицательной ионосферной бури. Особенно сильное снижение электронной концентрации в F-области отмечалось 8 марта над Паратункой (f_oF2 уменьшилась на 3–3.5 МГц) (панель *b*). Ионосфера так и не восстановилась до невозмущенного состояния. Следующая магнитная буря S2 была самой интенсивной из серии мартовских бурь 2012 г. Геомагнитная активность увеличивалась от уровня слабой бури 8 марта до сильной (класс G4) 9 марта ($Dst = -143$ нТл) (см. рис. 2). Эффект отрицательной ионосферной бури очень ярко отмечался по данным ионозондов Паратунка и Якутск. Критическая частота слоя F2 понизилась до 1.9 МГц в Паратунке (панель *a*). Ионосфера над регионом средних широт Дальнего Востока после сильной бури 9 марта снова не успела восстановиться до момента SSC следующей умеренной магнитной бури S3 12 марта, которая была самой слабой в серии анализируемых магнитных бурь в марте 2012 г. ($Dst = -51$ нТл) (см. рис. 2). Таким образом, существенное снижение ионизации в F2-слое ионосферы (f_oF2 уменьшилась примерно на 2–3 МГц) (панель *b*) наблюдалось в течение фазы восстановления бури S1, всей бури S2 и всей бури S3 практически до 14 марта, когда произошло частичное восстановление ионосферы до невозмущенного состояния.

Над Сибирским регионом по данным ионозондов в Иркутске и Новосибирске ионосфера в период бури S1 7 марта проявляла эффект положительной ионосферной бури (f_oF2 увеличилась на 2–3 МГц) (панель *b*) как на главной фазе магнитной бури, так и на фазе восстановления. Особенно значительное увеличение электронной концентрации в F-области отмечалось над Новосибирском на восстановительной фазе бури 8 марта, f_oF2 достигла значения 10.3 МГц (панель *a*). Возможно, это было проявление эффекта последствия магнитных бурь [Ратовский и др., 2018], который состоит в формировании положительных возмущений электронной концентрации в дневное время через несколько дней после начала фазы восстановления, причем значения ионизации при этом могут превышать уровень спокойных дней до начала магнитного возмущения. Над Сибирским регионом реакция ионосферы на сильную магнитную бурю S2 9 марта была также положительной в период главной фазы бури (f_oF2 увеличилась на 2.5–3 МГц) (панель *b*). Критические частоты слоя F2 9 марта достигали значений 10.26 и 10.2 МГц в Иркутске и Новосибирске соответственно (панель *a*). Во второй половине дня 9 марта произошла кратковременная смена реакции ионосферы с положительной на отрицательную. Но на фазе восстановления магнитной бури 10 марта значения ионизации вновь превышали фоновые на 2–3 МГц (панель *b*). Критическая частота слоя F2 достигала значения 10.4 МГц в Иркутске (панель *a*).

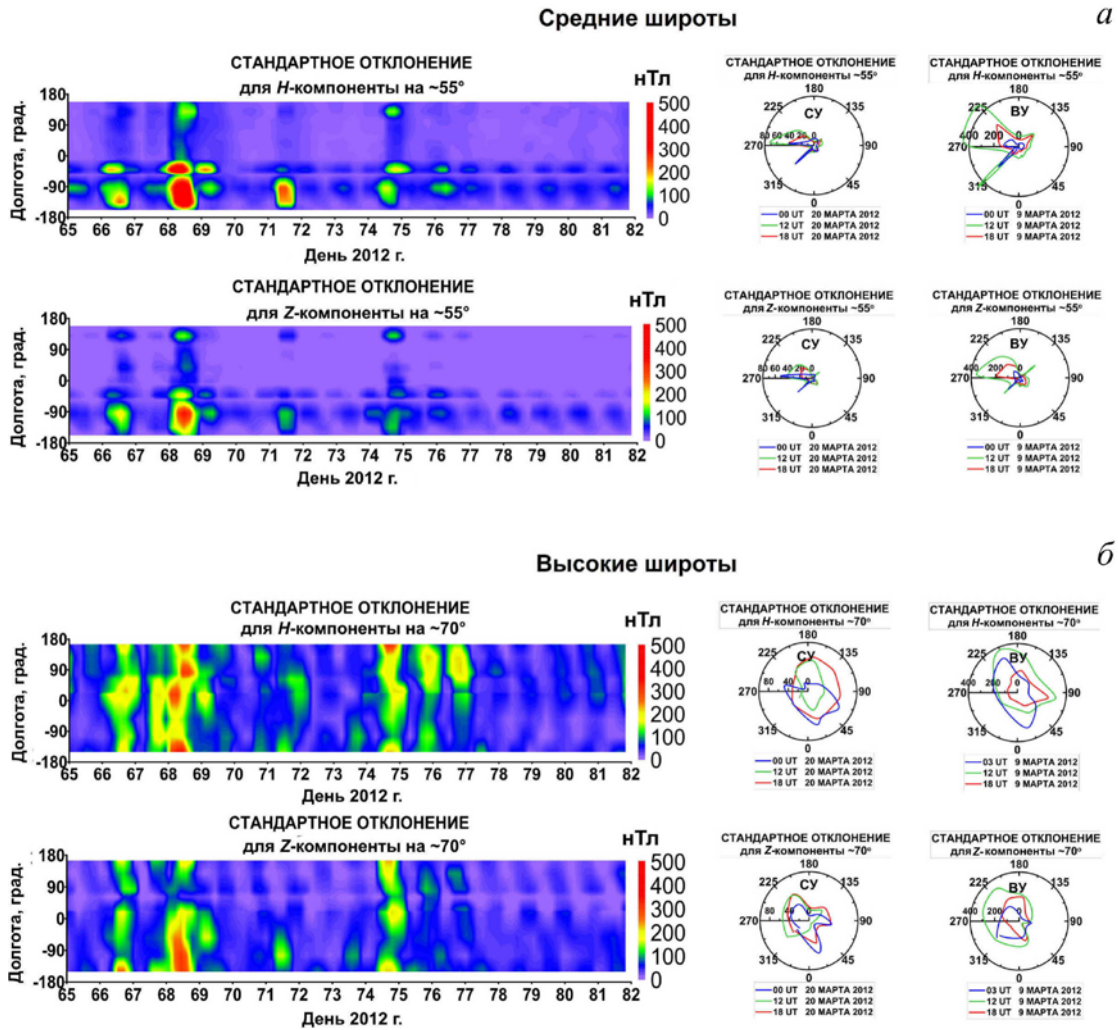


Рис. 3. Долготно-временные вариации дисперсий H - и Z -компонент ГМП 6–22 марта 2012 г. и распределения дисперсий ГМП в полярных координатах для отдельных дней марта 2012 г. для спокойных условий (СУ, левый столбец) и возмущенных условий (ВУ, правый столбец) на средних $\sim 55^\circ N$ (а) и высоких $\sim 70^\circ N$ широтах (б)

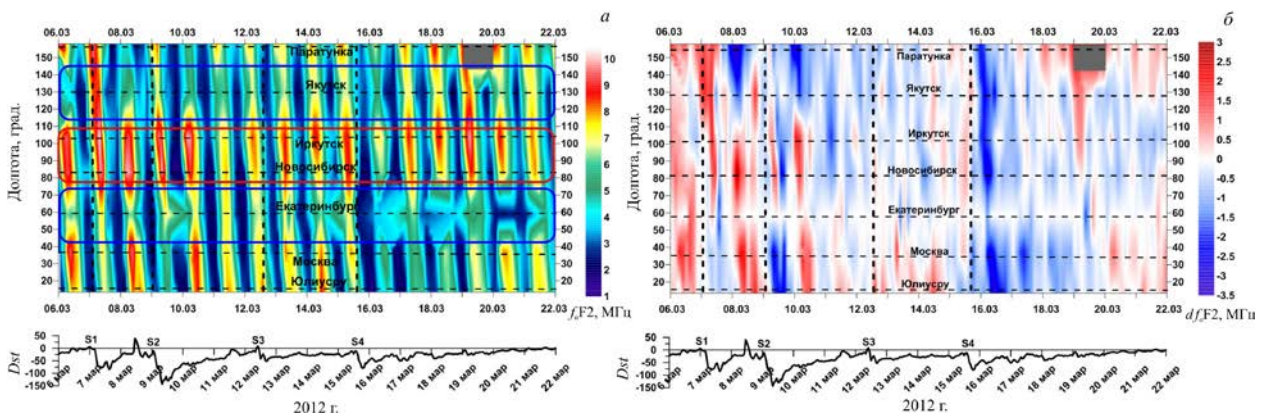


Рис. 4. Долготно-временные вариации f_oF2 (а) и абсолютных отклонений df_oF2 (б) по данным среднеширотной цепи ионозондов в период серии бурь в марте 2012 г. Вертикальными штриховыми линиями показаны SSC бурь; нижняя панель — вариации Dst

К концу дня 10 марта реакция ионосферы вновь стала отрицательной (f_oF2 уменьшилась на 3–3.5 МГц) (панель б). Эффект отрицательной ионосферной бури с этого момента был схож с тем, который отмечался для региона Дальнего Востока по данным ионозондов в Паратунке и Якутске. Ионизация ионо-

сферы над регионом средних широт Сибири и Дальнего Востока была понижена по сравнению со спокойными геомагнитными условиями. Ионосфера не восстановилась до момента SSC следующей умеренной магнитной бури S3 12 марта. Существенное понижение ионизации в F2-слое ионосферы (f_oF2

уменьшилась примерно на 2–3 МГц) (панель *б*) наблюдалось в течение главной и восстановительной фаз магнитной бури S3 практически до 14 марта, когда произошло частичное восстановление ионосферы до невозмущенного состояния.

Следует отметить, что при частичной схожести сценариев развития ионосферных бурь над регионами Дальнего Востока и Сибири в период фазы восстановления сильной магнитной бури 9 марта и во время всей умеренной магнитной бури 12 марта уровень ионизации ионосферы над Сибирским регионом был выше, чем над Дальневосточным (панель *а*).

Ионизация ионосферы по данным ионозонда в Екатеринбурге была пониженной в течение всех анализируемых магнитных бурь по сравнению с соседними регионами Сибири и Европы (панель *а*). Однако следует еще раз отметить, что в работе ионозонда «Парус-3.0» в Екатеринбурге были сбои и, как следствие, моменты отсутствия измерений. Поэтому подробный анализ реакции ионосферы на события магнитных бурь невозможен.

По данным европейских ионозондов в Москве и Юлиусру в период магнитной бури S1 7 марта произошло небольшое снижение f_oF2 на 1–1.5 МГц (панель *б*). Для Европейского региона наблюдался эффект отрицательной ионосферной бури вплоть до восстановления ионосферы к невозмущенным условиям 8 марта 2012 г. С началом сильной магнитной бури S2 9 марта 2012 г. ионосфера над регионом Европы проявляла свойства отрицательной ионосферной бури в периоды главной и восстановительной фаз вплоть до 10 марта, когда реакция ионосферы кратковременно сменилась на положительную. Начиная с 11 марта наступило восстановление ионизации ионосферы до уровня невозмущенных условий. На умеренную бурю S3 12 марта ионосфера реагировала незначительным увеличением ионизации (f_oF2 увеличилась на 1–2 МГц) (панель *б*).

Очень интересной была реакция ионосферы средних широт над Евразийским континентом на умеренную бурю ($Dst = -80$ нТл) (см. рис. 2), начавшуюся 15 марта (S4). На фазе восстановления с 16 по 18 марта буря сопровождалась событием СН HSS, что привело к продлению фазы восстановления бури. По данным всех среднеширотных ионозондов над территорией Евразии проявлялся эффект отрицательной ионосферной бури в периоды главной и восстановительной фаз магнитной бури. Минимальные значения ионизации отмечены над регионом Западной Европы. Критическая частота слоя F2 достигла значения 1.3 МГц 16 марта 2012 г. по данным ионозонда в Юлиусру (панель *а*). Отрицательная ионосферная буря продлилась до 20 марта над обширным регионом Евразии по данным ионозондов в Екатеринбурге, Москве, Юлиусру. С 20 марта ионизация ионосферы начала восстанавливаться до состояния невозмущенных дней. Над регионами Сибири (ионозонды в Иркутске, Новосибирске) и Дальнего Востока (ионозонд в Паратунке) процесс восстановления ионосферы начался с 18 марта 2012 г. — раньше, чем над регионом Европы.

На рис. 5 приведены вариации абсолютных отклонений dh_mF2 высот максимума слоя F2 от фоно-

вого уровня. В периоды магнитных бурь зона магнитосферной конвекции смещается из высоких широт в средние. В средние широты перемещаются силовые трубки ГМП с большим L (L — расстояние до вершины геомагнитной силовой линии в земных радиусах) и низкой концентрацией плазмы. Ионосферная плазма быстро вытекает вверх, уменьшая плотность ионизации в максимуме слоя F2 (соответственно уменьшая f_oF2) и увеличивая h_mF2 .

Существенные повышения максимума ионизации (более чем на 100 км) зарегистрированы в периоды эффектов отрицательных ионосферных бурь: для события умеренной магнитной бури S1 — по данным ионозондов в Иркутске, Новосибирске, Екатеринбурге, Москве, Юлиусру на восстановительной фазе бури 7 марта и по данным ионозонда в Паратунке на восстановительной фазе бури 8 марта; для события сильной магнитной бури S2 — по данным ионозондов в Новосибирске и Юлиусру на главной фазе бури 9 марта и по данным ионозонда в Паратунке на восстановительной фазе бури 10 марта (рис. 5, *а*).

Ранее отмечалось, что по данным всех среднеширотных ионозондов над территорией Евразии проявлялся эффект отрицательной ионосферной бури в периоды главной и восстановительной фаз магнитной бури S4 15 марта 2012 г. (см. рис. 4, *б*). Сильное повышение высоты максимума ионизации h_mF2 для этой умеренной магнитной бури было зарегистрировано ионозондом в Паратунке непосредственно после SSC и на главной фазе 15 марта; ионозондом в Новосибирске — на главной фазе 16 марта (см. рис. 5). Хотя минимальные значения ионизации отмечались над регионом Западной Европы 16 марта 2012 г. по данным ионозонда Юлиусру, увеличение высоты максимума ионизации над этим регионом было существенно меньше, чем над регионами Сибири и Дальнего Востока. Интерес представляет увеличение h_mF2 по данным ионозонда Якутск 18 марта. Вероятно, подъем h_mF2 связан с событием СН HSS, которым сопровождалась магнитная буря на фазе восстановления с 16 по 18 марта.

В периоды эффектов положительных ионосферных бурь абсолютное отклонение dh_mF2 снижалось до значений $-40 \div -60$ км. Такие же величины dh_mF2 отмечались в условиях, когда ионосфера начинала восстанавливаться до значений ионизации в невозмущенных условиях. Например, для события магнитной бури S4 15 марта восстановление ионизации ионосферы началось 18 марта первоначально в регионе $\sim 80^\circ - 110^\circ$ E (ионозонды в Новосибирске и Иркутске) (см. рис. 4, *а*; 5), где уровень вариаций ГМП всегда низкий по сравнению с соседними долготными областями (см. рис. 3, *а*).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАНЫХ

Ионосферные эффекты длительного периода геомагнитных возмущений в марте 2012 г. анализировались в ряде работ [Nabarulema et al., 2015, 2016; Verkhoglyadova et al., 2016; Belehaki et al., 2017; Krypiak-Gregorczyk, 2019].

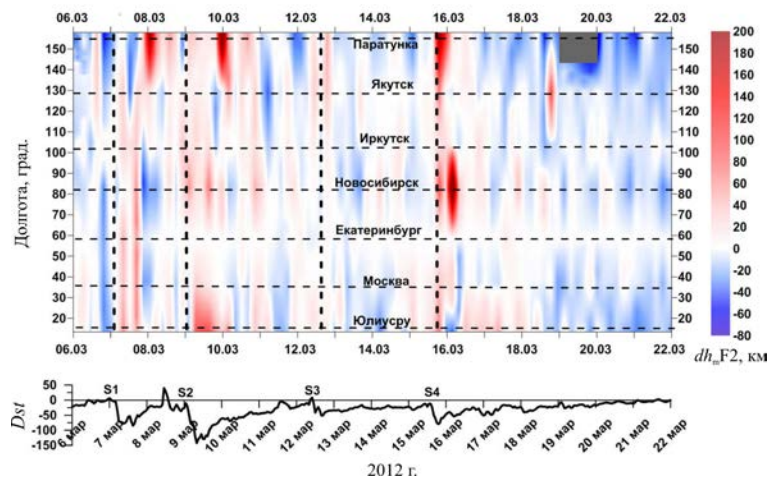


Рис. 5. Долготно-временные вариации абсолютных отклонений высоты максимума ионизации dh_mF_2 по данным среднеширотной цепи ионозондов в период серии бурь в марте 2012 г. Вертикальными штриховыми линиями показаны SSC бурь; нижняя панель — вариации Dst

В [Belehaki et al., 2017] выполнено исследование события магнитной бури 7–10 марта 2012 г. (бури S1, S2) на основе анализа данных ионозондов и приемников GPS в Дурбе (Бельгия) и Эбро (Испания), а также результатов моделирования. Эффект положительной ионосферной бури над Западной Европой был отмечен 7 марта 2012 г. Существенный рост ПЭС в средних широтах, по мнению авторов, был вызван эффектом экваториального суперфонтана, связанным с электрическими полями быстрого проникновения (PPEFs) в экваториальных широтах.

В [Nabarulema et al., 2015, 2016] также отмечен эффект положительной ионосферной бури над Африканским континентом в период магнитной бури 8–10 марта 2012 г. (бури S1, S2) в обоих полушариях. Причиной положительной ионосферной бури было расширение экваториальной аномалии ионизации в направлении средних широт. Однако авторы работ [Nabarulema et al., 2015, 2016] отметили, что физика этого конкретного геомагнитного возмущения была сложной. В течение всего возмущенного периода 7–17 марта 2012 г. имела место серия геомагнитных бурь S1–S4 [Tsurutani et al., 2014]. Поэтому после 10 марта 2012 г. (бури S3–S4) сценарий ионосферного отклика на геомагнитное возмущение изменился. Некоторые станции анализируемой меридиональной цепи приемников GPS и ионозондов фиксировали эффект отрицательной ионосферной бури. Это можно интерпретировать как диссипацию энергии суперфонтана при расширении структуры экваториальной аномалии в направлении к полюсу. По мнению авторов, происходит суперпозиция эффекта повышения электронной концентрации в результате расширения аномалии экваториальной ионизации на фоновую ионосферу и эффекта изменения состава термосферы аврорального происхождения, который ответственен за развитие эффекта отрицательной ионосферной бури. В таких случаях может происходить переключение между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури. Глобальные карты

ПЭС показали одновременное распространение крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений над Африкой как к полюсу, так и к экватору, в один и тот же период геомагнитной бури.

В [Verkhoglyadova et al., 2016] исследованы ионосферные эффекты магнитной бури S4 15–18 марта 2012 г. Для анализа эффектов в ионосфере использовались глобальные карты распределения вертикального ПЭС, которые показали слабую временную реакцию на магнитную бурю в средних и низких широтах.

В [Krupiak-Gregorczyk, 2019] представлены результаты подробного исследования вариаций параметров ионосферы над регионом Западной Европы по данным измерений приемников GPS/GLONASS и ионозондов (Рим, Юлиусру) в период магнитных бурь S1–S4 7, 9, 12 и 15 марта 2012 г. Дни 7 и 8 марта 2012 г. (S1) характеризовались положительными изменениями ПЭС. Однако уровень этих изменений зависел от широты. Наибольшее увеличение ПЭС наблюдалось во время бури S2 9 марта в самом южном широтном регионе и было связано с эффектом суперфонтана в экваториальной ионосфере. С ростом широты значения ПЭС уменьшались. Кроме того, на 50° N был виден четкий переход от эффекта положительной ионосферной бури к отрицательной. Отрицательная ионосферная буря наблюдается на всех анализируемых долготах и широтах выше 50° N. Этот отличающийся характер ионосферной бури для разных широтных регионов 9 марта 2012 г. связан с КВМ 7 марта, прибывшим на Землю спустя два дня. Событие S3 12 марта вызвало значительное однодневное увеличение ПЭС. Последней бурей S4 15 марта предшествовало увеличение ПЭС, за которым последовало его снижение, — в результате наблюдалась отрицательная фаза ионосферной бури. Следующие сутки 16 марта характеризовались самым большим снижением ПЭС за весь анализируемый период.

Результаты анализа вариаций ионизации ионосферы в период серии магнитных бурь в марте 2012 г.

на основе данных измерений среднеширотных евразийских ионозондов, представленные в настоящей работе, подтверждают выводы работ [Habarulema et al., 2015, 2016; Verkhoglyadova et al., 2016; Belehaki et al., 2017; Kuryiak-Gregorczyk, 2019]. Так же как авторы работ [Habarulema et al., 2015, 2016], мы подчеркиваем сложную физику этого длительного магнитовозмущенного периода с переходами эффектов положительной и отрицательной ионосферных бурь. Такие переходы произошли на фазе восстановления бури S1, когда положительный эффект ионосферной бури сменился отрицательным над Паратункой и Якутском; на главной и восстановительной фазах бури S2 дважды происходила кратковременная смена фаз ионосферной бури с положительной на отрицательную над Иркутском и Новосибирском; на фазе восстановления бури S2 отрицательный эффект ионосферной бури сменился положительным над Москвой и Юлиусру.

Смена эффектов положительной и отрицательной ионосферных бурь в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. может быть связана с совместным действием в регионе средних широт конкурирующих процессов, воздействующих на ионизацию, источники которых находятся в авроральной и экваториальной ионосфере. Авторы работ [Habarulema et al., 2015, 2016; Belehaki et al., 2017] связывают эффект положительной ионосферной бури с эффектом суперфонтана в приэкваториальных широтах в период 7–10 марта 2012 г.

Переключение между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури наблюдалось также для магнитной бури в марте 2015 г. [Shpynev et al., 2018; Chernigovskaya et al., 2021] и бури в октябре 2016 г. [Черниговская и др., 2021], которые развивались также в условиях равноденствия. Переход от одной фазы ионосферной бури к другой более характерен для зимы, чем для лета [Burešová et al., 2007]. Вероятность сценария со сменой эффекта ионосферной бури возрастает также с уменьшением широты. Для бурь в условиях равноденствия эта связь четко не определена. Однако март и октябрь в анализируемом среднеширотном диапазоне, скорее всего, относятся к зимней половине года.

В [Kuryiak-Gregorczyk, 2019] отмечалось, что на всех анализируемых долготах региона Западной Европы выше 50° N для магнитных бурь 7 и 9 марта наблюдалась отрицательная ионосферная буря. Мы отмечаем также эффект отрицательной ионосферной бури по данным ионозондов в Москве и Юлиусру на главных фазах бурь S1 и S2. Совпадают также выводы об эффекте положительной ионосферной бури для магнитной бури 12 марта и о длительном эффекте отрицательной ионосферной бури для магнитной бури 15 марта над регионом Европы.

Ранее в [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2020, 2021; Chernigovskaya et al., 2021] была выявлена долготная неоднородность ионосферы над регионом Евразии, основная причина которой заключалась в конфигурации ГМП. Нерегулярная структура долготной изменчивости компонент напряженности ГМП является следствием пространственных аномалий различных масштабов в фоновом магнитном

поле Земли, а также несовпадения магнитного и географического полюсов. Зоны максимальных вариаций ГМП соответствуют зонам усиленного проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт в средние. В магнито-возмущенные периоды образуются две зоны сильных вариаций ГМП симметрично относительно меридиана геомагнитного полюса вблизи долгот $\sim 40^\circ$ E и $\sim 130^\circ$ E. В этих долготных регионах отмечаются сильные отрицательные возмущения ионосферы, т. е. понижения f_oF_2 , что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы. В долготном секторе 80° – 110° E (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии) уровень вариаций ГМП всегда низкий. В связи с этим над регионом Евразии на долготах $\sim 80^\circ$ – 110° ионосфера имеет положительную аномалию и раньше других долготных областей восстанавливается после геомагнитных возмущений [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2020, 2021; Chernigovskaya et al., 2021].

В [Moro et al., 2019] по результатам исследования вариаций параметров ионосферы по данным двух низкоширотных ионозондов, расположенных примерно на одинаковых широтах в Северном и Южном полушариях, установлено, что во время геомагнитных бурь изменчивость ионосферных параметров выше для ионозонда в Санта-Мария (Бразилия), находящегося в регионе Южно-Американской магнитной аномалии, чем для ионозонда в Ухане (Китай). Авторы связывают эту особенность ионосферных эффектов на геомагнитные возмущения именно наличием региональных особенностей главного ГМП в регионе Южной Америки.

Анализ отклика среднеширотной ионосферы над Евразией на длительные геомагнитные возмущения в марте 2012 г. показал также проявление долготной неоднородности ионизации ионосферы, связанной с пространственными аномалиями в фоновом ГМП. В регионе $\sim 80^\circ$ – 110° E ионосфера в целом имела повышенный уровень электронной концентрации на высоте максимума ионизации ионосферы (красный контур на рис. 4, а). Критические частоты слоя F2 достигали значений ~ 9 – 10 МГц по данным измерений ионозондов в Новосибирске и Иркутске. Для событий магнитных бурь S3 и S4 ионосфера над Сибирским регионом начала восстанавливаться до значений ионизации в невозмущенных условиях раньше других долготных регионов Евразии (рис. 4, б). Этот долготный сектор характеризуется низким уровнем вариаций ГМП в регионе Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии (рис. 3, а) [Shpynev et al., 2018; Chernigovskaya et al., 2021]. В примыкающих к долготному сектору $\sim 80^\circ$ – 110° E регионах (регион Дальнего Востока $\sim 120^\circ$ – 140° E и регион Западной Сибири и Восточной Европы $\sim 40^\circ$ – 60° E) отмечаются сильные отрицательные возмущения ионосферы (синие контуры на рис. 4, а). Эти области соответствуют зонам усиленного проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт в средние, и в них отмечаются повышенные вариации ГМП в возмущенных геомагнитных условиях (рис. 3, а).

ВЫВОДЫ

Исследование вариаций параметров ионосферы в средних широтах Северного полушария над регионом Евразии по данным ионозондов и магнитометров глобальной сети INTERMAGNET во время серии геомагнитных бурь в марте 2012 г. подтверждает сделанный ранее в [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2020, 2021; Chernigovskaya et al., 2021] вывод о том, что структура магнитосферно-ионосферной токовой системы во время магнитных бурь зависит от пространственных аномалий главного геомагнитного поля, проявляющихся в вариациях параметров ГМП и ионосферы.

Подтверждена неоднородная структура долготной изменчивости компонент напряженности ГМП из-за несовпадения географического и геомагнитного полюсов (УТ-эффект), а также из-за пространственных аномалий разного масштаба в основном магнитном поле Земли.

Долготные особенности структуры главного ГМП и его вариации при изменении геомагнитных условий приводят к выраженной долготной неоднородности в ионосфере.

Во время главной фазы бури долготная динамика геомагнитных и ионосферных возмущений является почти синхронной в высоких и средних широтах и связана с глобальным перемещением зоны магнитосферной конвекции с высоких широт на средние.

Во время магнитной бури вариации главного ГМП становятся значительными. Они могут играть важную роль в формировании долготных неоднородностей ионосферы, особенно на восстановительной фазе бури.

Подчеркнута сложная физика длительного магнитовозмущенного периода в марте 2012 г. с переключением между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури в один и тот же период магнитной бури для различных пространственных областей. Смена эффектов ионосферной бури в анализируемый период могла быть связана с суперпозицией в регионе средних широт конкурирующих процессов, влияющих на ионизацию ионосферы, источники которых находятся в авроральной ионосфере (серия интенсивных событий солнечной активности, приведших к геомагнитным бурям 7, 9, 12, 15 марта 2012 г. и к существенной возмущенности атмосферы и ионосферы высоких широт), а также в экваториальной ионосфере (эффект суперфонтана в приэкваториальных широтах 7–10 марта 2012 г.).

На фазе восстановления бури наибольшее падение ионизации отмечалось в зонах сильных вариаций ГМП на долготах ~120°–140° Е (по данным ионозондов в Якутске и Паратунке) и ~40°–60° Е (по данным ионозондов в Москве и Екатеринбурге).

Над Сибирским регионом Евразии на долготах ~80°–110° Е (по данным ионозондов в Новосибирске и Иркутске) ионосфера в целом имела повышенный уровень ионизации и раньше других долготных зон начинала восстанавливаться после геомагнитных возмущений ввиду низкого уровня вариаций ГМП на этих долготах.

Долготные особенности вариаций ионосферных параметров в периоды серии магнитных бурь в марте 2012 г., сильной бури в октябре 2016 г. [Черниговская и др., 2021] и экстремальной бури в марте 2015 г. [Shpynev et al., 2018; Chernigovskaya et al., 2021] в условиях равноденствия при идентичной фоновой (невозмущенной) ионосфере с выраженным переходом от дневных условий к ночным были схожи с аналогичным ярким проявлением долготных вариаций, связанных с зависимостью от изменчивости вариаций главного ГМП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект FWZZ-2022-0019 для ИНГГ СО РАН). Экспериментальные данные получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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).
- 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., Шпынев Б.Г., Ясюкевич А.С. и др. Долготные вариации отклика среднеширотной ионосферы северного полушария на геомагнитную бурю в октябре 2016 г. с помощью мультиинструментальных наблюдений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 305–317. DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-5-305-317](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-305-317).
- Astafyeva E.I. Dayside ionospheric uplift during strong geomagnetic storms as detected by the CHAMP, SAC-C, TOPEX and Jason-1 satellites. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43, iss. 11. P. 1749–1756. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.036).
- Astafyeva E., Zakharenkova I, Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 9023–9037. DOI: [10.1002/2015JA021629](https://doi.org/10.1002/2015JA021629).
- Belehaki A., Kutiev I., Marinov P., et al. Ionospheric electron density perturbations during the 7–10 March 2012 geomagnetic storm period. *Adv. Space Res.* 2017. Vol. 59, iss. 4. P. 1041–1056. DOI: [10.1016/j.asr.2016.11.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.031).
- Blanc M., Richmond A.D. The ionospheric disturbance dynamo. *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85. P. 1669–1686.
- 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*. 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).

Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Adv. Space Res.* 2013. Vol. 52. P. 343–366. DOI: [10.1016/j.asr.2013.04.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.019).

Dmitriev A.V., Huang C.-M., Brahmanandam P.S., et al. Longitudinal variations of positive dayside ionospheric storms related to recurrent geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118. P. 6806–6822. DOI: [10.1002/jgra.50575](https://doi.org/10.1002/jgra.50575).

Dudok de Wit T., Watermann J. Solar forcing of the terrestrial atmosphere. *Comptes Rendus Geoscience.* 2009. Vol. 342. no. 4-5. P. 259–272. DOI: [10.1016/j.crte.2009.06.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.06.001).

Habarulema J.B., Katamzi Z.T., Yizengaw E. First observations of poleward large-scale traveling ionospheric disturbances over the African sector during geomagnetic storm conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 6914–6929. DOI: [10.1002/2015JA021066](https://doi.org/10.1002/2015JA021066).

Habarulema J.B., Katamzi Z.T., Yizengaw E., et al. Simultaneous storm time equatorward and poleward large-scale TIDs on a global scale. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43. P. 6678–6686. DOI: [10.1002/2016GL069740](https://doi.org/10.1002/2016GL069740).

Hafstad L.R., Tuve M.A. Note on Kennelly-Heaviside layer observations during a magnetic storm. *Terrestrial magnetism and atmospheric electricity.* 1929. Vol. 34, no. 1. P. 39–43.

Krypiak-Gregorczyk A. Ionosphere response to three extreme events occurring near spring equinox in 2012, 2013 and 2015, observed by regional GNSS-TEC model. *J. Geodesy.* 2019. Vol. 93. P. 931–951. DOI: [10.1007/s00190-018-1216-1](https://doi.org/10.1007/s00190-018-1216-1).

Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., et al. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites. *GPS Solutions.* 2016. Vol. 20. P. 877–884. DOI: [10.1007/s10291-015-0500-2](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0500-2).

Li Q., Liu L., Balan N., et al. Longitudinal structure of the midlatitude ionosphere using COSMIC electron density profiles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123. P. 8766–8777. DOI: [10.1029/2017JA024927](https://doi.org/10.1029/2017JA024927).

Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, iss. A7. P. 14,209–14,213.

Mansilla G.A. Mid-latitude ionospheric effects of a great geomagnetic storm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. Vol. 66. P. 1085–1091. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.04.003).

Mansilla G.A., Zossi M.M. Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes. *Pure Appl. Geophys.* 2020. Vol. 177. P. 5833–5844. DOI: [10.1007/s00024-020-02601-1](https://doi.org/10.1007/s00024-020-02601-1).

Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959. Vol. 64, no. 3. P. 305–321. DOI: [10.1029/JZ064i003p00305](https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305).

Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006. Vol. 44. RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Moro J., Xu J., Denardini C.M., et al. On the sources of the ionospheric variability in the South American Magnetic Anomaly during solar minimum. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 7638–7653. DOI: [10.1029/2019JA026780](https://doi.org/10.1029/2019JA026780).

Prölss G.W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of atmospheric electrodynamics.* CRC Press, Boca Raton, 1995. Vol. 2. Ch. 8. P. 195–248.

Prölss G.W., Brace L.H., Mayr H.G., et al. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: A case study. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96. P. 1275–1288.

Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. Vol. 60. P. 1385–1402.

Shpynev B.G., Zolotukhina N.A., Polekh N.M., et al. The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 180. P. 93–105. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014).

Tsurutani B., Mannucci A., Iijima B., et al. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A08302. DOI: [10.1029/2003JA010342](https://doi.org/10.1029/2003JA010342).

Tsurutani B., Echer E., Shibata K., et al. The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAWSES II overview. *J. Space Weather Space Climate.* 2014. Vol. 4, no. A02. DOI: [10.1051/swsc/2013056](https://doi.org/10.1051/swsc/2013056).

Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J., et al. Solar wind driving of ionosphere-thermosphere responses in three storms near St. Patrick’s Day in 2012, 2013, and 2015. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 8900–8923. DOI: [10.1002/2016JA022883](https://doi.org/10.1002/2016JA022883).

Wang H., Zhang K. Longitudinal structure in electron density at mid-latitudes: upward-propagating tidal effects. *Earth, Planets and Space.* 2017. Iss. 1, article id. 11. DOI: [10.1186/s40623-016-0596-9](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0596-9).

URL: <http://www.intermagnet.org> (дата обращения 19 июля 2022 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 19 июля 2022 г.).

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 19 июля 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 19 июля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Мелич Й. Исследование отклика среднеширотной ионосферы Северного полушария на магнитные бури в марте 2012 г. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 4. С. 46–56. DOI: [10.12737/szf-84202204](https://doi.org/10.12737/szf-84202204).