

ДОЛГОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОНОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ В МАРТЕ 2012 г. ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДОВ И GPS/ГЛОНАСС

IONOSPHERIC LONGITUDINAL VARIABILITY IN THE NORTHERN HEMISPHERE DURING MAGNETIC STORMS IN MARCH 2012 FROM IONOSONDE AND GPS/GLONASS DATA

М.А. Черниговская 

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

А.С. Ясюкевич 

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

Д.С. Хабитуев 

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

M.A. Chernigovskaya

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

A.S. Yasyukevich

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

D.S. Khabituev

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

Аннотация. Комплексное исследование пространственно-временных вариаций геомагнитных, ионосферных и атмосферных параметров в области средних и высоких широт Северного полушария в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. расширено включением в анализ данных вертикального полного электронного содержания (ПЭС) по измерениям на цепях двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС. Установленные ранее по данным вертикального зондирования особенности долготных вариаций ионизации ионосферы над средними широтами Евразии подтверждены данными вертикального ПЭС. Подчеркнута сложная физика длительного магнитовозмущенного периода в марте 2012 г. с переключением между положительным и отрицательным эффектами ионосферной бури на одинаковых фазах магнитной бури для пространственно разнесенных среднеширотных областей восточного полушария. Такие смены эффектов ионосферной бури могли быть связаны с суперпозицией в регионе средних широт восточного полушария конкурирующих процессов из-за изменений состава термосферы, термосферных ветров и крупномасштабных электрических полей, влияющих на ионизацию ионосферы. Отмечены существенные различия в характере реакции ионизации ионосферы восточного и западного полушария на продолжительное геомагнитное возмущение в марте 2012 г. По данным ПЭС на долготах западного полушария в противоположность восточному наблюдался эффект пониженной ионизации ионосферы. Эффект отрицательной ионосферной бури был вызван образованием обширных областей атмосферного газа с пониженным отношением концентраций $[O]/[N_2]$ над регионом средних широт западного полушария в зоне максимального проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт на средние. По данным цепей магнитометров сети INTERMAGNET для анализируемого периода магнитных бурь 7–20 марта 2012 г. в регионе средних широт Северного полушария максимальные

Abstract. A comprehensive study of spatio-temporal variations of geomagnetic, ionospheric, and atmospheric parameters in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere during a series of magnetic storms in March 2012 has been expanded by including vertical total electronic content (TEC) data from measurements at the chains of dual-frequency phase receivers GPS/GLONASS in the analysis. The features of longitudinal variations in ionosphere ionization over mid-latitude Eurasia, found earlier from vertical sounding data, are confirmed by vertical TEC data. We emphasize the complex physics of the long magnetically disturbed period in March 2012 with switching between positive and negative effects of an ionospheric storm during the same magnetic storm phases for spaced mid-latitude regions of the Eastern Hemisphere. Such changes in the ionospheric storm effects might have been caused by the superposition of competing processes in the mid-latitude region of the Eastern Hemisphere due to variations in the thermospheric composition, thermospheric winds, and large-scale electric fields affecting ionospheric ionization. We have observed significant differences in the nature of the ionospheric ionization reaction between the Eastern and Western hemispheres to the prolonged geomagnetic disturbance in March 2012. According to TEC data, there was an effect of reduced ionization of the ionosphere at longitudes of the Western Hemisphere, unlike the Eastern one. The effect of a negative ionospheric storm was caused by the formation of vast areas of atmospheric gas with a reduced density ratio $[O]/[N_2]$ over the mid-latitude region of the Western Hemisphere in the zone of maximum penetration of geomagnetic disturbances from high latitudes to middle latitudes. According to the INTERMAGNET magnetometer chain data for the analyzed period of magnetic storms on March 7–20, 2012, at midlatitudes of the Northern Hemisphere the maximum geomagnetic field variations were observed in the Western Hemisphere.

вариации геомагнитного поля наблюдались именно в западном полушарии

Ключевые слова: цепь приемников GPS/ГЛО-НАСС, цепь ионозондов, ионосферные и термосферные возмущения, вариации геомагнитного поля, геомагнитная буря.

ВВЕДЕНИЕ

Целью статьи является исследование пространственно-временных вариаций параметров в системе магнитосфера—ионосфера—термосфера в периоды проявления повышенной солнечной активности (солнечных вспышек, корональных выбросов массы, высокоскоростных потоков из корональных дыр), когда происходит резкое увеличение скорости солнечного ветра в течение длительных периодов (от нескольких до многих часов). Результатом сложных процессов взаимодействия высокоэнергичного солнечного ветра с главным геомагнитным полем (ГМП) являются значительные возмущения напряженности ГМП, которые называются геомагнитными бурями [Dudok de Wit, Watermann, 2009].

В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс процессов (ионосферные бури), в результате которых существенно изменяются ее параметры [Prölss, 1995; Rishbeth, 1998; Buonsanto, 1999]. Причиной возмущений в ионосфере Земли, в первую очередь, является последовательность взаимосвязанных событий, начинающихся с проявлений повышенной солнечной активности, которые затем влияют на систему солнечный ветер — магнитосфера—ионосфера. В других случаях ионосферные возмущения вызваны внутренними факторами в системе ионосфера—термосфера, которые связаны с процессами в нейтральной атмосфере. В обоих случаях возникают возмущения ионосферной ионизации различной интенсивности и разных пространственных и временных масштабов.

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 геомагнитных возмущений f_oF_2 может уменьшаться или увеличиваться по сравнению со значениями в спокойных условиях (соответственно отрицательные или положительные ионосферные бури) [Matsushita, 1959]. Генерируемые в периоды магнитных бурь возмущенные электрические поля [Tsurutani et al., 2004; Huang, 2013] — 1) практически мгновенно появляющиеся зональные электрические поля быстрого проникновения (prompt penetration electric fields, PPEFs), часто наблюдаемые в экваториальных широтах, и 2) электрические поля с задержкой, создаваемые возмущенным динамо в результате джоулева нагрева из-за поступления энергии в период магнитной бури в высоких широтах — могут вызывать большие восходящие или нисходящие потоки ионосферной плазмы, приводящие к крупномасштабным увеличениям или уменьшениям ионизации и вертикального полного электронного содержания (ПЭС). Развитие отрицательных и положительных

Keywords: chain of GPS/GLONASS receivers, ionosonde chain, ionospheric and thermospheric disturbances, geomagnetic field variations, geomagnetic storm.

эффектов ионосферных бурь сильно зависит от местного времени, сезона, географического региона [Prölss, 1995; Rishbeth, 1998; Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Burešová et al., 2007].

Отрицательные ионосферные бури являются доминирующей характеристикой в ионосферном отклике на усиление геомагнитной активности и, как правило, связаны со смещением области главного ионосферного провала к экватору [Prölss, 1995; Rishbeth, 1998]. Seaton [1956] впервые предположил, что уменьшение электронной плотности может быть связано с вариациями состава термосферного нейтрального газа. Усиление авроральной электроструи в западном направлении в области высоких широт индуцирует нейтральные ветры, которые перераспределяют нейтральный состав атмосферы по большей части региона высоких широт и части региона средних широт. Выше уровня турбопаузы (около 120 км) начинается диффузионное разделение атмосферных газов. Чем выше, тем большее количество кислорода находится в атомарном состоянии. На высотах 200–300 км и выше преобладающим становится атомарный кислород, который как более легкий газ подвержен более сильному переносу по сравнению с молекулярным азотом. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению [O]/[N₂] на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в F-области ионосферы [Mayr, Volland, 1972; Laštovička, 2002; Prölss, Werner, 2002; Danilov, 2003; Liou et al., 2005; Klimenko et al., 2011].

Положительные ионосферные бури обусловлены усилением направленных к экватору нейтральных ветров, возникающих в результате поступления энергии в авроральные широты в период магнитной бури [Prölss, 1995]. Когда происходят положительные ионосферные бури, 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 геомагнитных бурь. Электрические поля быстрого проникновения (PPEFs) усиливают электродинамический дрейф $\vec{E} \times \vec{B}$ в области экватора, приводя к подъему ионосферной плазмы до высот 800–1000 км [Astafyeva, 2009]. Образуется гигантский плазменный фонтан (дневной ионосферный супер-фонтан), переносящий плазму из приэкваториальной области на большие высоты и в более высокие широты [Tsurutani et al., 2004]. Согласно Данилову [2013], PPEFs, ответственные за положительные эффекты ионосферных бурь, которые наблюдаются в низких и средне-низких широтах даже во время умеренных бурь, маскируют эффекты отрицательных ионосферных бурь. Фотоионизация нижней F области ионосферы производит «новую» плазму, которая

возмещает поднятую вверх под действием дрейфа $\vec{E} \times \vec{B}$, тем самым приводя к увеличению ПЭС. Это является доминирующим эффектом положительных ионосферных бурь в средних широтах.

Таким образом, процессы в нейтральной атмосфере являются неотъемлемой частью сложной последовательности электродинамических и химических процессов, развивающихся в системе ионосфера—термосфера в периоды гелиогеомагнитной активности. Для изучения взаимосвязей этих процессов часто используются спутниковые данные о вариациях состава атмосферы на высотах термосферы. В частности, с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED [Christensen et al., 2003] выполняются измерения $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа выше 100 км. Этот физический параметр является одним из ключевых параметров, определяющих состояние системы ионосфера—термосфера во время ионосферных бурь. Он отражает циркуляцию атомарного кислорода на высотах термосферы и является хорошим индикатором отрицательных фаз ионосферных бурь.

На предыдущих этапах исследований на основе данных евразийской среднеширотной цепи ионизондов, а также средне- и высокоширотных цепей приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров сети INTERMAGNET был проведен анализ долготных особенностей отклика ионосферы на экстремальные магнитные бури в марте и июне 2015 г. [Shrynev 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]. В работах [Черниговская и др., 2022а, б] продолжен анализ ионосферных эффектов магнитных бурь с использованием отработанной методики анализа геомагнитных и ионосферных ионизондовых данных для серии магнитных бурь в марте 2012 г.

Выполненный ранее комплексный анализ позволил сделать вывод о том, что основная причина установленных долготных вариаций параметров ионосферы заключается в долготных особенностях структуры главного ГМП и его вариаций при изменении геомагнитных условий, а также несовпадении магнитного и географического полюсов (так называемые УТ-вариации).

Низкие значения ионизации на восстановительной фазе бури (через 2–4 дня после главной фазы) могут быть обусловлены распространением над регионом средних широт атмосферной волны нейтрального газа с низким содержанием $[O]/[N_2]$ в западном направлении. 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 на большие расстояния даже при «выключении» ионосферного источника в авроральных широтах.

В настоящей работе авторы продолжают и расширяют исследование приведенных выше физических механизмов, включая в анализ данные измерений цепей двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. [Черниговская и др., 2022а, б].

ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа пространственно-временных вариаций ионосферных параметров в период длительного геомагнитного возмущения в марте 2012 г. используются 1) данные ПЭС по измерениям на средне- и высокоширотной цепях двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС (рис. 1, а); 2) данные о среднечасовых значениях критической частоты f_oF_2 слоя F2 ионосферы по измерениям цепи из семи среднеширотных ионизондов, расположенных в диапазоне широт примерно 50° – 60° N с интервалом 15° – 20° по долготе в секторе 13° – 158° E евразийского континента (рис. 1); 3) данные о вариациях H - и Z -компонент напряженности ГМП по измерениям на средне- и высокоширотной цепях магнитометров глобальной сети INTERMAGNET [<http://www.intermagnet.org>] (рис. 1, б); 4) спутниковые измерения $[O]/[N_2]$ в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~ 100 км, проводимые оптическим методом с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED [<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>].

Среднеширотная цепь состоит из 15 приемников GPS/ГЛОНАСС в диапазоне широт 50° – 55° N (панель а, зеленые флажки). Высокоширотная цепь состоит из 13 приемников GPS/ГЛОНАСС в диапазоне широт 65° – 70° N (панель а, красные флажки). Подробную информацию о станциях, составляющих цепь приемников GPS/ГЛОНАСС, можно найти в работах [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. Расчет вертикального ПЭС по исходным рядам проводился на основе разработанной модели абсолютного ПЭС с учетом дифференциальных кодовых задержек [Yasyukevich et al., 2015].

Евразийскую среднеширотную цепь ионизондов (белые кружки) составляли ионизонд АИС (Паратунка), два российских ионизонда «Парус» различных модификаций (Новосибирск, Екатеринбург) и четыре цифровых ионизонда DPS-4 различных модификаций (Якутск, Иркутск, Москва, Юлиусру). Подробное описание ионизондов, а также методика обработки и анализа ионосферных параметров (критическая частота и высоты максимума ионизации слоя F2), опубликованы в работах [Chernigovskaya et al., 2021; Черниговская и др., 2022а]. Там же описаны средне- и высокоширотная цепи магнитометров глобальной сети INTERMAGNET (панель б) и методика анализа вариаций H - и Z -компонент напряженности ГМП.

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. (события S1–S4, таблица). Подробное развитие событий гелиогеомагнитной активности описано в работе [Черниговская и др., 2022а]. Солнечная актив-

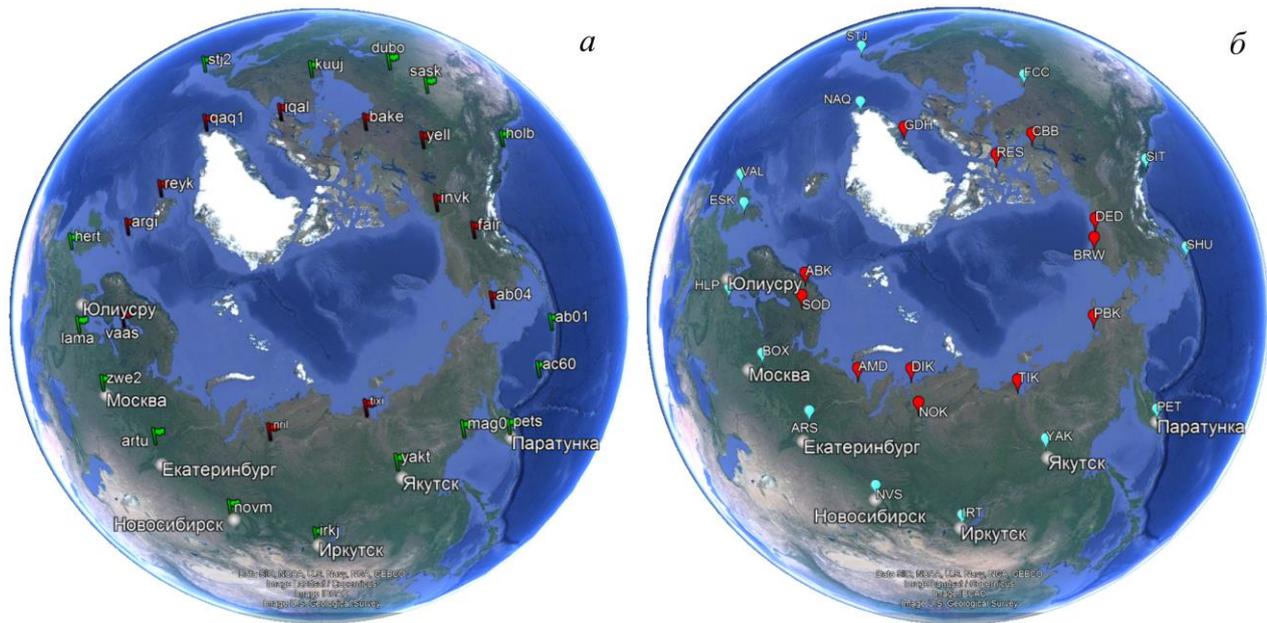


Рис. 1. Расположение цепей ионозондов и приемников GPS/ГЛОНАСС (а); ионозондов и магнитометров (б)

Характеристики геомагнитных бурь в марте 2012 г.

Обозначение бури	Параметры в максимуме геомагнитной бури [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]			Интенсивность бури	
	<i>Dst</i> -индекс (см. рис. 3, в, з)	<i>K_p</i> -индекс	<i>A_p</i> -индекс	По <i>Dst</i> -индексу [Loewe, Prölss, 1997]	По классификации NASA [https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation]
S1	-85 нТл в 15:00 UT 07.03.2012	6 _o	80 нТл	умеренная	класс G2
S2	-143 нТл в 08:00 UT 09.03.2012	8 _o	207 нТл	сильная	класс G4
S3	-51 нТл в 16:00 UT 12.03.2012	6 ₊	94 нТл	умеренная	класс G2
S4	-80 нТл в 19:00 UT 15.03.2012	6 ₊	94 нТл	умеренная	класс G2

ность была на высоком уровне 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), 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 (CMEs — coronal mass ejections), направленными на Землю. В исследуемый период произошло событие высокоскоростного потока (CH HSS — coronal hole high speed stream) из одной корональной дыры, которое длилось с 16 по 18 марта после внезапного начала (SSC — sudden storm commencement) магнитной бури S4. Хорошо известно, что события CH HSS вызывают также рост геомагнитной активности. Все четыре магнитные бури связаны с повышенными скоростями солнечного ветра, связанными с CMEs и CH HSS, повышенными напряженностью межпланетного магнитного поля, плотностью и температурой плазмы.

Для анализа изменчивости ГМП в периоды рассматриваемых магнитных бурь в марте 2012 г. ис-

пользуется стандартное отклонение *H*- и *Z*-компонент напряженности ГМП относительно фоновых невозмущенных значений. На рис. 2 показаны долготные распределения стандартных отклонений *H*- и *Z*-компонент напряженности ГМП в Северном полушарии по данным цепей магнитометров сети INTERMAGNET на средних (панель а) и высоких (панель б) широтах.

В долготном распределении вариаций ГМП, как и в наших предыдущих исследованиях событий магнитных бурь 2015 и 2016 г. [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2020, 2021; Chernigovskaya et al., 2021], явно выделяются долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы. Максимальная изменчивость стандартных отклонений величин *H*- и *Z*-компонент ГМП наблюдается в большинстве случаев на средних широтах (вблизи ~55° N) (панель а). На высоких широтах (вблизи ~70° N) изменчивость ГМП более равномерна по долготе (панель б), но долготные неоднородности вариаций ГМП

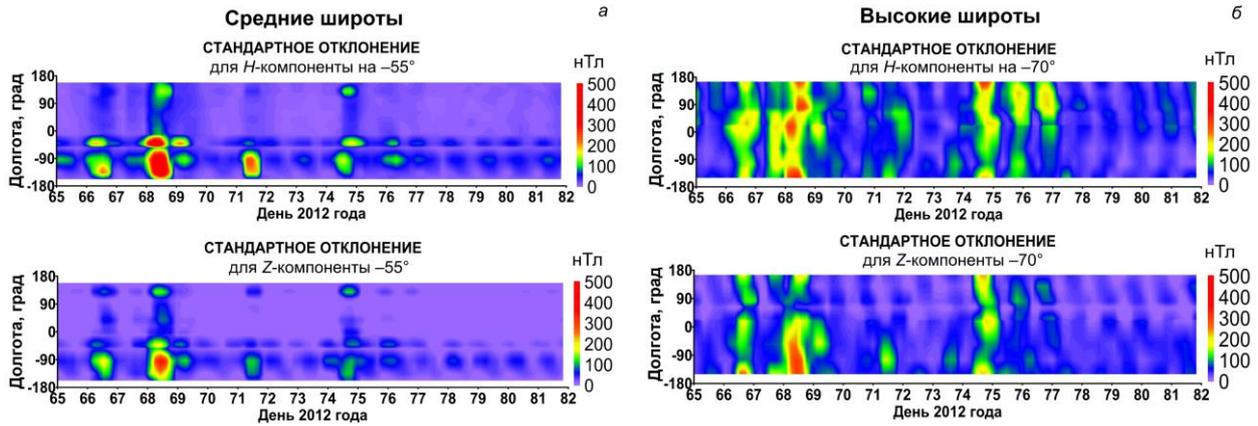


Рис. 2. Долготно-временные вариации стандартных отклонений H - и Z -компонент ГМП 6–22 марта 2012 г. (UT) на средних $\sim 55^\circ$ N (а) и высоких широтах $\sim 70^\circ$ N (б)

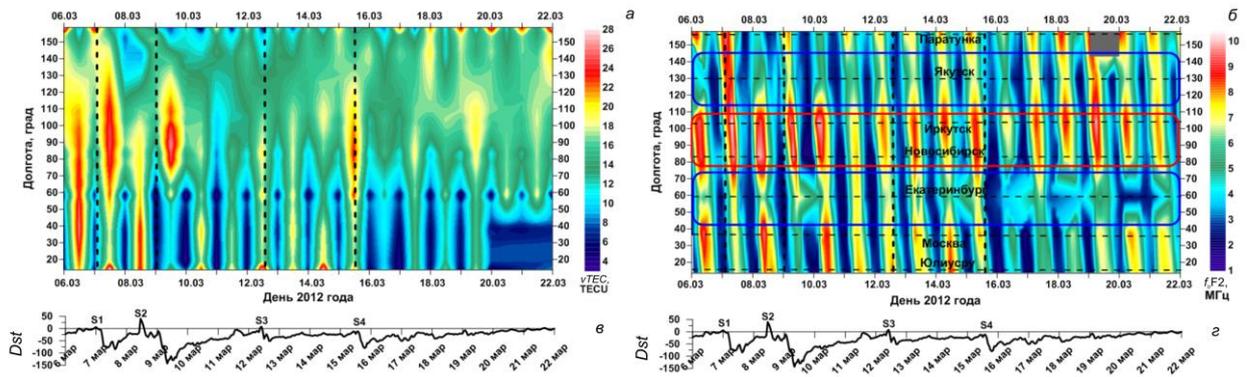


Рис. 3. Долготно-временные вариации ПЭС по данным среднеширотной цепи приемников GPS/ГЛОНАСС (а) и f_oF2 по данным евразийской среднеширотной цепи ионозондов (б) [Черниговская и др., 2022а] в марте 2012 г. (UT). Вертикальные штриховые линии отмечают SSC бурь. Вариации индекса геомагнитной активности Dst (в, з)

также проявляются. Авторы считают, что нерегулярная структура долготной изменчивости компонент ГМП является следствием пространственных аномалий разных масштабов в главном магнитном поле Земли, а также несовпадения магнитного и географического полюсов (UT-эффект).

Для анализируемого периода магнитных бурь 7–20 марта 2012 г. в регионе средних широт Северного полушария максимальные вариации компонент ГМП отмечались в западном полушарии в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи $\sim 90^\circ$ W и на долготах $\sim 45^\circ$ W и $\sim 135^\circ$ W (см. рис. 2, а). На средних широтах восточного полушария изменчивость компонент ГМП была существенно ниже. Зона повышенных вариаций ГМП проявилась на долготах ~ 120 – 140° N над регионом Дальнего Востока Евразии.

Долготы, где наблюдаются сильные вариации напряженности ГМП, соответствуют зонам максимального проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт в средние. Эти области характеризуются сильными отрицательными возмущениями ионизации ионосферы, т. е. понижением f_oF2 по сравнению с невозмущенными условиями, что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы. В секторе долгот 80° – 110° E (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), симметрич-

ном расположенному в западном полушарии геомагнитному полюсу, уровень вариаций ГМП всегда ниже по сравнению с соседними долготными регионами. В связи с этим над регионом Евразии на долготах $\sim 80^\circ$ – 110° наблюдается область повышенной по сравнению с соседними долготами ионизации на высотах F2-области (красный овал на рис. 3, б). На этих долготах раньше происходит восстановление ионизации ионосферы к невозмущенному состоянию после геомагнитных бурь [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019; Chernigovskaya et al., 2021].

АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗАЦИИ ИОНОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

На рис. 3 представлены для сравнения долготно-временные вариации, характеризующие ионизацию ионосферы над евразийским континентом в диапазоне широт 50° – 60° N во время серии бурь в марте 2012 г. по данным среднеширотных цепей двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС (а) и ионозондов (б). Вертикальными штриховыми линиями показаны SSC магнитных бурь в марте 2012 г., вызванные воздействием межпланетных ударных волн на магнитосферу Земли. Подробный анализ вариаций параметров ионосферы на высотах максимума ионизации F2-слоя на средних широтах Евразии по данным

цепи из семи ионозондов в период повышенной геомагнитной активности в марте 2012 г. выполнен в работах [Черниговская и др., 2022а, б].

В случае длительного геомагнитно-возмущенного периода, включающего последовательность интенсивных (сильных или умеренных) магнитных бурь, происходят глобальные изменения в структуре ГМП (сжатие магнитосферы под действием межпланетной ударной волны возмущенного солнечного ветра; пересоединение силовых линий межпланетного и геомагнитного полей; флуктуации размеров магнитосферы при взаимодействии с усиленным потоком солнечной плазмы; усиление кольцевого тока в западном направлении из-за проникновения в магнитосферу новых частиц и ускорения плазмы; генерация авроральной электроструи поля, противоположного геомагнитному, и, как следствие, уменьшение H -компоненты ГМП). Поэтому оба используемых радиофизических метода будут показывать сходные вариации, что подтверждается результатами, приведенными на рис. 3. Можно сделать заключение, что качественно распределения на панелях a , b достаточно хорошо согласуются. По этой причине далее в наших исследованиях мы можем использовать данные вариаций ПЭС для описания глобальных долготных неоднородностей ионосферы в областях, где отсутствуют ионозонды в анализируемом диапазоне широт, как дополнение ряда данных наземных ионозондовых измерений.

Вариации ПЭС по данным среднеширотной цепи приемников GPS/ГЛОНАСС (см. рис. 3, a) подтверждают сложную физику длительного магнитно-возмущенного периода в марте 2012 г. с переключением между положительной ($S1$, $S2$, 7–10 марта 2012 г.) и отрицательной ($S3$, $S4$, 12 и 15 марта 2012 г.) фазами ионосферной бури для различных долготных областей региона средних широт восточного полушария. В вариациях ПЭС ярко проявляются основные характерные особенности анализируемого периода: 1) эффект развития положительной ионосферной бури над всей среднеширотной территорией Евразии (панель a) на главной и восстановительной фазах умеренной магнитной бури 7 марта 2012 г. ($S1$ на панели b); 2) интенсивное положительное возмущение в ионосфере над обширной территорией Сибири и Дальнего Востока (панель a) на главной и восстановительной фазах сильной магнитной бури 9 марта 2012 г. ($S2$ на панели b).

Цепь среднеширотных ионозондов охватывает только евразийский континент; в западном полушарии на средних широтах в диапазоне 50° – 60° N североамериканского континента ионозонды, к сожалению, отсутствуют [<https://giro.uml.edu/ionoweb>] (см. рис. 1). Однако анализ долготных распределений вариаций ГМП показывает, что в североамериканском секторе могут располагаться области сильных вариаций ионосферных параметров, связанные с зонами усиленного проникновения геомагнитных возмущений на средние широты (см. рис. 2, a). В связи с этим для полноты исследования долготных вариаций в средне- и высокоширотной ионосфере Северного полушария в период серии магнитных бурь в марте

2012 г., связанных с вариациями ГМП, в данной работе были использованы данные средне- и высокоширотной цепей двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС (см. рис. 1, a). Данные ПЭС, охватывающие не только материковую часть Евразии и Северной Америки, но и океанические острова, позволили рассмотреть гораздо больший пространственный масштаб развития ионосферного возмущения, связанного с эволюцией длительного геомагнитного возмущения.

Рассмотрим более детально глобальные пространственно-временные вариации ПЭС (рис. 4) для средних (a) и высоких (b) широт Северного полушария. При росте магнитной возмущенности изменчивость ионизации меньше на высоких широтах, чем на средних. Этот эффект отмечался также в работе [Araujo-Pradere et al., 2005].

Из карт долготно-временных вариаций ПЭС (панели a , b) можно отметить, что долготные различия в вариациях ПЭС между восточным (положительные долготы) и западным (отрицательные долготы) полушариями в периоды серии анализируемых магнитных бурь в марте 2012 г. проявляются очень ярко в области средних и высоких широт.

Прежде всего, эффект положительной ионосферной бури, который наблюдался в период магнитных бурь 7–10 марта 2012 г. ($S1$, $S2$) по данным среднеширотных ионозондов над Европой, Сибирью и Дальним Востоком [Черниговская и др., 2022а, б], а авторы работ [Nabarulema et al., 2015, 2016; Verkhoglyadova et al., 2016; Belehaki et al., 2017; Kruziak-Gregorczyk, 2019] наблюдали по данным ионозондов и приемников GPS над Западной Европой и Африкой, совершенно не проявился на долготах западного полушария над Северной Америкой по данным измерений приемников GPS/ГЛОНАСС (панели a , b). Наблюдаются низкие значения ПЭС на долготах западного полушария в период бурь 7–10 марта 2012 г. как на средних (рис. 4, a), так и на высоких широтах (панель b).

Здесь уместно вспомнить, что для периода магнитных бурь 7–20 марта 2012 г. самые сильные долготные вариации компонент ГМП отмечались на средних широтах западного полушария (см. рис. 2, a). Следовательно, на этих долготах возмущения из высокоширотной ионосферы максимально проникали на средние широты. Эти области обычно характеризуются сильными отрицательными возмущениями ионосферы, т. е. понижения f_oF2 по сравнению с невозмущенными условиями, что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы. Именно проявление эффекта отрицательной ионосферной бури на долготах западного полушария иллюстрируют панели a , b .

На нижних панелях рис. 4 показаны долготно-временные распределения $[O]/[N_2]$ в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~ 100 км для среднеширотного 55° – 56° N (b) и высокоширотного 69° – 71° N (c) диапазонов по измерениям УФ-спектрометра GUVI TIMED [Christensen et al., 2003]. Распределение $[O]/[N_2]$ на панели c для высокоширотного круга доступно только для периода

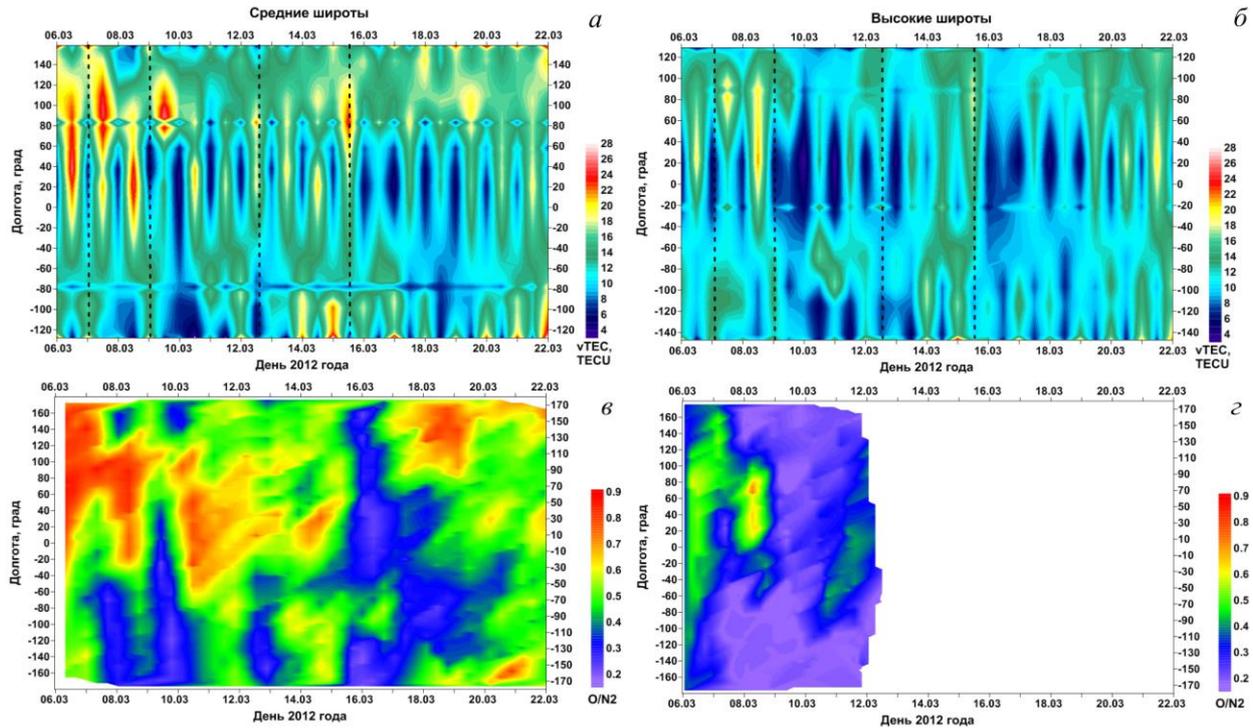


Рис. 4. Долготно-временные вариации ПЭС по данным средне- (а) и высокоширотной (б) цепей приемников GPS/ГЛОНАСС; долготно-временные распределения $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED для средних (в) и высоких (z) широт в марте 2012 г. (UT)

6–12 марта 2012 г., вероятно, в связи с изменением наклона орбиты пролетов спутника TIMED. Сложные электродинамические процессы, протекающие в условиях повышенной геомагнитной активности в полярных широтах приводят к сильному уменьшению $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы. Этот физический параметр является хорошим индикатором отрицательных фаз ионосферных бурь [Prölss, Werner, 2002; Laštovička, 2002; Danilov, 2003; Liou et al., 2005; Klimentenko et al., 2011]. Сравнивая вариации ионизации ионосферы на высоте F2-слоя на средних широтах восточного полушария над Евразией (см. рис. 3, а, б), ПЭС ионосферы (см. рис. 4) средних (а) и высоких (б) широт Северного полушария с нейтральным составом на этих же широтах (в, z) можно сделать заключение, что изменения этих параметров очень хорошо коррелируют.

Подтверждением существенного различия реакции ионосферы Северного полушария на различных долготах, зарегистрированного ионозондами евразийской среднеширотной цепи и приемниками GPS/ГЛОНАСС средне- и высокоширотной цепей в период магнитных бурь в марте 2012 г., является пространственно-временное распределение $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED (рис. 4, в, z). Над Евразией (долготы восточного полушария) в периоды SSC магнитных бурь S1 и S2 7 и 9 марта 2012 г. располагалась область повышенных значений $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED. В это же время над Северной Америкой (долготы западного полушария) располагалась обширная область низких значений $[O]/[N_2]$. Очевидно, что в западном полушарии преобладающим было влияние возмущений, распро-

странившихся на средние широты из высокоширотной ионосферы. Поэтому развивался сценарий отрицательной ионосферной бури в отличие от восточного полушария, где доминировало расширение экваториальной аномалии ионизации в направлении средних широт. Этот факт подтверждается данными измерений цепи среднеширотных магнитометров глобальной сети INTERMAGNET, которые показали существенно более низкий уровень изменчивости компонент ГМП на средних широтах восточного полушария по сравнению с западным полушарием (см. рис. 2, а).

Очень интересной была реакция ионосферы средних широт на умеренную бурю S4 (класса G2) (см. рис. 3, в, z), начавшуюся 15 марта 2012 г. На фазе восстановления с 16 по 18 марта буря сопровождалась событием CH HSS, что привело к продлению фазы восстановления бури. По данным всех среднеширотных ионозондов над территорией Евразии проявлялся эффект отрицательной ионосферной бури (см. рис. 3, б) в периоды главной и восстановительной фаз магнитной бури [Черниговская и др., 2022а, б]. Данные измерений приемников GPS/ГЛОНАСС подтвердили эффект отрицательной ионосферной бури (рис. 4) для средних (а) и высоких (б) широт Северного полушария. В период 16–17 марта 2012 г. наблюдался глубокий провал в значениях $[O]/[N_2]$ для средних широт восточного и западного полушарий (см. рис. 4, в).

На рис. 5, б показана последовательность карт глобальных пространственных распределений $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы выше ~100 км по измерениям GUVI TIMED для каждого дня 6–21 марта 2012 г.

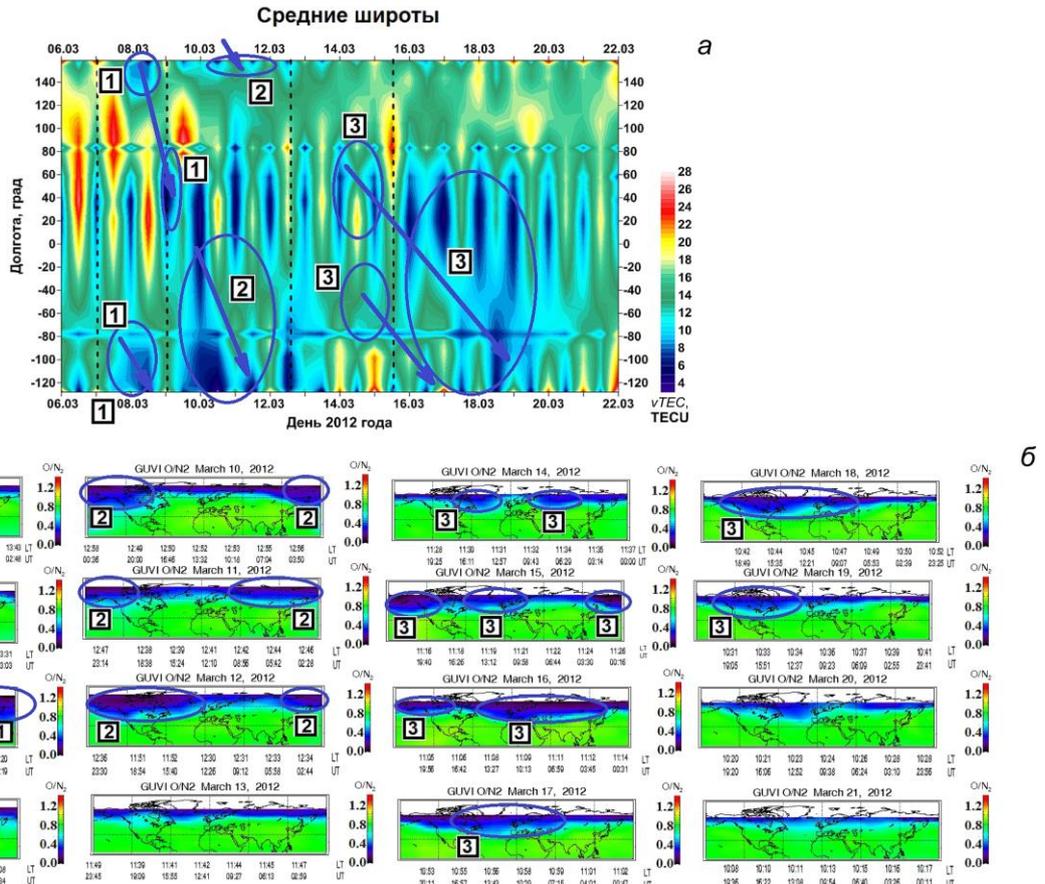


Рис. 5. Долготно-временные вариации ПЭС по данным среднеширотной цепи приемников GPS/ГЛОНАСС (а). Карты глобальных пространственных распределений $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы выше ~ 100 км по измерениям GUVI TIMED для каждого дня 6–21 марта 2012 г. в Северном полушарии (б). Синие овалы — области пониженного $[O]/[N_2]$, пронумерованные 1, 2, 3. Наклонные синие стрелки — перемещение областей пониженного ПЭС (а), связанных с пространственным перемещением с востока на запад крупномасштабной волны пониженного $[O]/[N_2]$

в Северном полушарии [<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery3on2>]. Временная эволюция ото дня ко дню этих глобальных карт позволяет визуализировать перемещение крупномасштабных областей пониженного $[O]/[N_2]$ в области средних широт Северного полушария. Такой анализ дает возможность еще раз проверить гипотезу образования в нижней термосфере полярных широт на главной фазе магнитной бури волны атмосферного газа с пониженным $[O]/[N_2]$. Образовавшись в полярных областях термосферы, эта волна затем распространяется в область средних широт Северного полушария и перемещается в западном направлении в течение нескольких суток в период восстановительной фазы бури. За счет высокой частоты столкновений молекулярных ионов и нейтралов такая волна приобретает большой масштаб и импульс и перемещается на большие расстояния даже при «выключении» ионосферного источника в авроральных широтах [Shrynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2022б; Chernigovskaya et al., 2021]. Как подчеркивалось выше, отношение $[O]/[N_2]$ является одним из ключевых параметров, определяющих состояние системы ионосфера—термосфера во время ионосферных бурь. Следствием понижения $[O]/[N_2]$ в термосферном газе является уменьшение электронной концентрации в данной

области и соответственно развитие эффекта отрицательной ионосферной бури. Для прослеживания взаимосвязи $[O]/[N_2]$ с изменениями ионизации ионосферы на рис. 5, а показана карта долготно-временного распределения ПЭС по данным среднеширотной цепи приемников GPS/ГЛОНАСС. В области средних широт, как отмечалось выше, отклик ионосферы на рост геомагнитной возмущенности проявляется ярче.

Представленные на рис. 5, б данные спутниковых измерений $[O]/[N_2]$ показывают образование обширных областей пониженного $[O]/[N_2]$ в западном полушарии над территорией Северной Америки 7 марта 2012 г. непосредственно после SSC умеренной магнитной бури S1. Область отмечена овалом с цифрой 1. Этому уменьшению $[O]/[N_2]$ соответствует понижение ПЭС на долготах 80° – 120° W (овал 1 на рис. 5, а). Область повышенных значений $[O]/[N_2]$ регистрировалась 7 марта 2012 г. на долготах Дальнего Востока и Сибири, 8 марта область повышенного $[O]/[N_2]$ сместилась на запад к долготам Европы. На этих долготах отмечался эффект положительной ионосферной бури в период магнитной бури S1 (см. рис. 3, а, б) [Черниговская 2022а, б]. Область 1 пониженного $[O]/[N_2]$ сместилась 8 марта 2012 г. на запад к региону акватории Тихого океана и Дальнего Востока на фазе восстановления бури S1. Ей соответствует понижение

ПЭС на долготах 140° – 160° E (овал 1 в верхней части рис. 5, а). Понижение ионизации 8 марта 2012 г. подтверждается также данными ионозондов Паратунка и Якутск (см. рис. 3, б) [Черниговская 2022а, б]. Над регионом Дальнего Востока развивалась отрицательная ионосферная буря, тогда как над соседними долготными регионами средних широт Евразии отмечался эффект положительной ионосферной бури. В последующий день 9 марта 2012 г. область 1 пониженного ПЭС переместилась на запад по направлению к европейскому региону.

Сильная магнитная буря S2 (класса G4) началась 9 марта 2012 г. В этих условиях вновь интенсифицировались возмущения в полярной термосфере и ионосфере. В результате $[O]/[N_2]$ еще больше уменьшилось на высотах верхней атмосферы в полярных областях. Область пониженного $[O]/[N_2]$ распространилась на средние широты вплоть до низких в западном полушарии на главной и восстановительной фазах бури S2. Образовалась более обширная область пониженного $[O]/[N_2]$ в западном полушарии над средними широтами американского континента (область 2), которая к 10 марта 2012 г. переместилась к региону экватории Тихого океана, достигла долгот 140° – 160° E и вновь была зарегистрирована над регионом Дальнего Востока (овал 2 в верхней части рис. 5, а). Эффект проявления отрицательной ионосферной бури ярко проявился по данным ионозондов Паратунка и Якутск (см. рис. 3, б). Формирование такой гигантской области (2) пониженного $[O]/[N_2]$ на долготах западного полушария подтверждает вывод о том, что область повышенного проникновения возмущений из высоких широт на средние находилась именно в этом долготном секторе. Здесь же наблюдалась зона максимальных вариаций ГМП (см. рис. 2, а) для периода магнитных бурь в марте 2012 г. [Черниговская и др., 2022а]. В последующие дни 11–12 марта 2012 г. на восстановительной фазе сильной бури S2 наблюдалось движение области пониженного $[O]/[N_2]$ над территорией Евразии из восточного полушария в западное и далее к экватории Тихого океана и побережью Дальнего Востока.

В течение периода восстановления самой слабой по интенсивности в анализируемом периоде магнитной бури S3 (класса G2) 13 марта отмечалась тенденция к повышению $[O]/[N_2]$ в области средних широт на всех долготах (см. рис. 5, б). Существенных вариаций ионизации (см. рис. 5, а) соответственно не наблюдалось. Но уже 14 марта и с началом 15 марта 2012 г. умеренной магнитной бури S4 (класса G2), которая помимо CMEs сопровождалась событием CH HSS с 16 по 18 марта, геомагнитная возмущенность в полярной области вновь возросла. Это опять привело к формированию 14 марта 2012 г. обширной волнообразной области пониженного $[O]/[N_2]$ над территорией Европы и над восточной частью североамериканского континента (область 3). Эта волна 15 марта 2012 г. сместилась к западу на долготы Западной Европы, Северной Америки, Тихого океана и Дальнего Востока. К 16 марта область 3 сместилась к региону Сибири и Европы, 16 марта — к региону Атлантического океана, затем 17–19 марта — к американскому континенту в западном полушарии.

В период длительной фазы восстановления 16–20 марта 2012 г. бури S4, когда сформировалась обширная волна пониженного $[O]/[N_2]$ практически над всем среднеширотным кругом, которая перемещалась в западном направлении (см. рис. 5, б), был отмечен эффект отрицательной ионосферной бури (см. рис. 4, а) над всеми долготами региона средних широт Северного полушария. Существенное длительное снижение ионизации отмечалось над регионом Северной Америки на долготах западного полушария (см. рис. 5, а) и над регионом Европы в восточном полушарии (см. рис. 3, б) практически до 20 марта 2012 г.

Ионизация ионосферы над Сибирью и Дальним Востоком на долготах 80° – 110° E ранее других регионов уже 17 марта 2012 г. восстановилась до значений в невозмущенных условиях (см. рис. 5, а и рис. 3, б). Это является подтверждением выводов о пониженном уровне вариаций компонент ГМП в этом долготном секторе (см. рис. 2, а) [Shpynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2022а, б; Chernigovskaya et al., 2021].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Физические механизмы формирования ионосферных бурь (положительных и отрицательных) в марте 2012 г.

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; Krupiak-Gregorczyk, 2019] по данным ионозондов и приемников GPS/GLONASS. Всеми авторами отмечен эффект положительной ионосферной бури над регионами Западной Европы и Африканского континента (в обоих полушариях) в период магнитных бурь 7–10 марта 2012 г. (бури S1, S2). Основной причиной положительной ионосферной бури авторы называют расширение экваториальной аномалии ионизации в направлении средних широт.

Однако авторы работ [Nabarulema et al., 2015, 2016] подчеркивают, 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 анализируемых авторами меридиональных цепей 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 ответстве-

нен за развитие отрицательной ионосферной бури. В таких случаях может происходить переключение между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури.

Длительное событие повышенной гелио-геомагнитной активности в марте 2012 г. было чрезвычайно эффективным в части его возможного влияния не только на ионосферу, но и на атмосферу Земли. В работе [Anagnostopoulos et al., 2022] утверждается, что март 2012 г. ознаменовался двумя экстремальными явлениями в околоземной среде: во-первых, исторически экстремальной волной тепла в США и Канаде и, во-вторых, событием возрастания интенсивности солнечных энергичных частиц (SEP — solar energetic particles) (протонов, ионов и электронов). Выше в разделе «Анализ гелио-геомагнитной обстановки и вариаций ГМП» упоминалось, что в анализируемый в работе временной период произошли серия крупных солнечных вспышек, связанных с CMEs, а также событие CH HSS из корональной дыры. Событие SEP характеризовалось регистрацией спектра протонов, простирающегося до очень высоких (>0.5 ГэВ) энергий. Связанное с CMEs событие SEP в марте 2012 г. сопровождалось необычайно сильными высыпаниями электронов в высокоширотной ионосфере [Anagno-stopoulos et al., 2022]. Проявление этого события мы видим по эффекту отрицательной ионосферной бури над Северной Америкой по данным цепей приемников GPS/ГЛОНАСС (см. рис. 4, а, б), а также по обширной области низких значений отношения плотности $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED над североамериканским континентом (см. рис. 4, в, г). Очевидно, что в западном полушарии преобладающим было влияние возмущений, развивающихся в периоды повышенной гелиогеомагнитной активности в высокоширотной ионосфере.

Anagnostopoulos et al. [2022] отмечают, что март 2012 г. был самым теплым на территории североамериканского континента за всю историю наблюдений с марта 1910 г. Фактически это было «метеорологическое мартовское безумие» из-за резкого повышения температуры с -2 до 28 °С на 30° . Среднесуточные температуры превышали норму на $15-20$ °С. Авторы связывают данную температурную аномалию в марте 2012 г. с необычно сложными межпланетными условиями, вызванными проявлением солнечной активности. В дополнение к солнечным протонам высоких энергий (>0.5 ГэВ), которые, по видимому, играют главную роль, высокоскоростные потоки солнечного ветра (CH HSS) и сильные высыпания магнитосферных электронов, возможно, способствовали генерации крупномасштабных потоков (волн) теплого воздуха из Мексиканского залива в северо-восточную часть США и Канаду. Наличие и перемещение крупномасштабных структур нейтрального атмосферного газа в период анализируемого геомагнитного события в марте 2012 г. убедительно подтверждают последовательность карт глобальных пространственных распределений отношения плотности $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED в марте 2012 г. в Северном полушарии (см. рис. 5, б).

Сравнение радиофизических методов анализа ионизации ионосферы

Используемые для исследования методы радиофизических измерений взаимно дополняют и обогащают друг друга. Метод вертикального зондирования позволяет детально анализировать пространственно-временные особенности вариаций параметров ионосферы на высоте максимума ионизации в F2-слое и нижележащих слоях ионосферы в периоды развития ионосферных возмущений. Метод дистанционного зондирования ионосферы сигналами спутников GPS/ГЛОНАСС, дающий интегральные характеристики ионосферы, позволяет эффективно исследовать глобальные особенности развития ионосферных неоднородностей.

Ранее мы отмечали достаточно хорошее качественное согласие пространственно-временных распределений ионизации ионосферы, полученных по данным измерений наземного вертикального зондирования и измерений цепей двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС (см. рис. 3, а, б). Подобные результаты мы получали в наших предыдущих исследованиях экстремальных магнитных бурь в марте и июне 2015 г. [Черниговская и др., 2020; Chernigovskaya et al., 2021]. Это лишний раз подтверждает хорошо установленный факт, что основной вклад в ПЭС вносит область ионосферы, расположенная в окрестностях главного максимума ионизации, т. е. слой F2 ([Афраймович, Перевалова, 2006] и ссылки в работе).

Однако есть и очевидные различия, причины которых необходимо обсудить. Для объяснения наблюдаемых различий в картинах долго- и коротковременных вариаций f_oF2 и ПЭС следует учесть существенную разницу в физической природе анализируемых ионосферных параметров. Интегральное ПЭС включает в себя вклад области выше максимума ионизации (внешней ионосферы и плазмосферы) [Кринберг, Ташилин, 1984], где наземные ионозонды не проводят измерения.

Вопрос о вкладе внешней ионосферы и плазмосферы в глобальное распределение ПЭС не решен до настоящего времени, хотя его решение является очень важным. Практически все работы, где были сделаны попытки изучить вклад внешней ионосферы и плазмосферы в ПЭС, основывались на численном моделировании с использованием разнообразных моделей. При этом большинство исследований проводилось лишь для ограниченной области долгот и широт и только в небольшом числе исследований предпринималась попытка решить эту задачу в глобальном масштабе [Косов и др., 2018].

Были получены достаточно разнообразные результаты в зависимости от типа модели и от геомагнитных условий. Все исследователи отмечали наличие сезонных, суточных, а также широтных вариаций в величине вклада внешней ионосферы и плазмосферы в ПЭС. Например, в [Bilitza, 2009] установлено, что около 80 % ПЭС в ионосфере приходится на часть, расположенную над пиком F-слоя, известную как верхняя (внешняя) ионосфера. Авторы [Yizengaw et al., 2008] утверждают, что относительный вклад электронного содержания плазмосферы

в зависимости от широты имеет суточный ход, минимальный (~10 %) днем и максимальный (до 60 %) ночью. Вклад также максимален в экваториальной области, где траектория луча GPS проходит большое расстояние через плазмосферу по сравнению с его длиной на средних и высоких широтах.

Совместный анализ данных Иркутского радара некогерентного рассеяния и данных ПЭС GPS [Shrynev, Khabituev, 2014] показал, что вклад электронной концентрации плазмосферы в ПЭС может составлять 30–50 % в летний и равноденственный сезоны. Зимой при отсутствии источников ионизации в нижней ионосфере суммарная ионизация плазмосферы невелика и F2-слой целиком образуется в пределах небольшого диапазона высот 200–400 км.

В работе [Клименко и др., 2015] показано, что среднеширотная ионосфера в главную фазу бури более изменчива, чем плазмосфера, и вносит основной вклад в возмущения ПЭС. В то же время на средних и экваториальных широтах формируются пространственные области, в которых вклад плазмосферы в ПЭС возрастает на 20–25 %. В работе [Klimenko et al., 2015] на основе результатов модельных расчетов и данных наземных и спутниковых наблюдений GPS и COSMIC показано, что максимальный вклад плазмосферы в ПЭС (до 85 %) наблюдается ночью вблизи экватора. Дневной вклад плазмосферы в ПЭС не превышает ~40 %, что согласуется с результатами предыдущих исследований [Balan et al., 2002].

В работе [Yasyukevich et al., 2020] показано, что вклад плазмосферы в ПЭС зависит от местного времени и сезона. В дневное время электронное содержание плазмосферы (ЭСП) составляет 25–30 % ПЭС и имеет минимальное значение около полудня. В ночное время вклад плазмосферы существенно возрастает: в среднем он составляет около половины ПЭС, а в отдельные периоды достигает 70 %. На высоких широтах вклад ночной плазмосферы больше, чем на средних широтах. Отношение ЭСП/ПЭС начинает увеличиваться после захода солнца и достигает максимума перед восходом. Отношение не меняется с ростом солнечной активности. Установлено, что модель IRI-Plas значительно занижает уровень вклада плазмосферы в ПЭС, особенно в ночное время.

В работе [Prol et al., 2021] с использованием нового метода томографической реконструкции для оценки электронной плотности по данным ПЭС вдоль спутников METOP (METeoro logical OPerational) показано, что вклад ПЭС плазмосферы в интегральный ПЭС может изменяться на 10–60 % во время геомагнитных бурь, а в фазе восстановления бури вклад имеет тенденцию к уменьшению.

Авторы работы [Nabarulema et al., 2021] впервые статистически определили вклад верхней ионосферы в ПЭС GPS на основе радиозатменных данных COSMIC и выявили, что на нее приходится около 50 % ПЭС в периоды низкой солнечной активности. Выполненный анализ продемонстрировал, что определение вклада электронной содержания на разных высотах важно для понимания механизмов ионосферных бурь во время явлений космической погоды, особенно геомагнитных бурь.

Обзор даже небольшого числа приведенных выше исследований по данной тематике показывает, что вопрос об относительном вкладе в ПЭС внутренней и внешней ионосферы с плазмосферой все еще далек от окончательного решения и весьма актуален.

ВЫВОДЫ

Исследование вариаций параметров ионосферы на средних широтах Северного полушария по данным приемников GPS/ГЛОНАСС, ионозондов и магнитометров глобальной сети INTERMAGNET во время серии геомагнитных бурь в марте 2012 г. подтверждает ранее сформулированные выводы [Shrynev et al., 2018; Черниговская и др., 2019, 2020, 2021; Chernigovskaya et al., 2021] о том, что 1) структура магнитосферно-ионосферной токовой системы во время магнитных бурь зависит от пространственных аномалий основного геомагнитного поля, проявляющихся в вариациях параметров ГМП и ионосферы; 2) низкие значения ионизации на длительной восстановительной фазе бури (через 2–4 дня после главной фазы) могут быть обусловлены распространением над регионом средних широт атмосферной волны нейтрального газа с низким содержанием [O]/[N₂] в западном направлении на большие расстояния даже при «выключении» ионосферного источника в авроральных широтах.

Проведенное комплексное исследование позволило сделать следующие выводы.

Подтверждены результаты о нерегулярной структуре долготной изменчивости компонент ГМП в спокойных и возмущенных условиях, обусловленной несовпадением Северного географического и геомагнитного полюсов (УТ-эффект), а также наличием аномалий различных пространственных масштабов в главном магнитном поле Земли.

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

Подчеркнута сложная физика магнито-возмущенного периода с переключением между положительной и отрицательной фазами ионосферной бури в период магнитных бурь 7–10 марта 2012 г. для различных долготных областей региона средних широт Северного полушария. 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 суперфронта в приэкваториальных широтах 7–10 марта 2012 г.).

Отмечены существенные различия в характере реакции ионосферы восточного и западного полушария на продолжительное геомагнитное возмущение в марте 2012 г.

На долготях западного полушария наблюдался эффект пониженной ионизации ионосферы по данным ПЭС в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. Подобная реакция ионосферы была вызвана образованием обширных областей пониженного $[O]/[N_2]$ над регионом средних широт западного полушария в зоне максимального проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт на средние. Это подтверждается наблюдением повышенных вариаций компонент ГМП в западном полушарии по данным измерений среднеширотной цепи магнитометров глобальной сети INTERMAGNET.

Гигантские области пониженного $[O]/[N_2]$ формировались в западном полушарии над регионом Северной Америки непосредственно после SSC 7 марта 2012 г. умеренной магнитной бури S1 и SSC 9 марта 2012 г. сильной магнитной бури S2 в виде крупномасштабных термосферных волн молекулярного газа, распространявшихся в западном направлении в течение нескольких суток.

Над регионом средних широт Евразии на долготях $\sim 80^\circ$ – 110° ионосфера раньше восстановилась после геомагнитных возмущений ввиду пониженного уровня вариаций ГМП в этом долготном секторе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта РНФ № 23-27-00322.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. С. 90–94.

Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор). *Гелиогеофизические исследования*. 2013. № 5. С. 1–33.

Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение радиоволн КВ-диапазона. I. Ионосферные эффекты. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55, № 5. С. 769–789. DOI: [10.7868/S0016794015050077](https://doi.org/10.7868/S0016794015050077).

Косов А.С., Чернышов А.А., Могилевский М.М. и др. Космический эксперимент по измерению ионосферных задержек сигнала ИЗРС (ионосферные задержки радиосигнала). *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 6. С. 13–23. DOI: [10.31857/S020596140003364-1](https://doi.org/10.31857/S020596140003364-1).

Кринберг И.А., Тащилин А.В. *Ионосфера и плазмосфера*. М.: Наука, 1984. 129 с.

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

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. *Совре-*

менные 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).

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С. и др. Исследование отклика среднеширотной ионосферы северного полушария на магнитные бури в марте 2012 года. *Солнечно-земная физика*. 2022а. Т. 8, № 4. С. 46–56. DOI: [10.12737/szf-84202204](https://doi.org/10.12737/szf-84202204).

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С. Отклик системы «ионосфера–термосфера» над регионом средних широт Евразии на геомагнитные бури в марте 2012 года. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022б. Т. 19, № 5. С. 303–315. DOI: [10.21046/2070-7401-2022-19-5-303-315](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-303-315).

Anagnostopoulos G.C., Menesidou S.-A.I., Efthymiadis D.A. The March 2012 heat wave in Northeast America as a possible effect of strong solar activity and unusual space plasma interactions. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, iss.6. P. 926. DOI: [10.3390/atmos13060926](https://doi.org/10.3390/atmos13060926).

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).

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. P. 1749–1756. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.036).

Balan N., Otsuka Y., Tsugawa T., et al. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity. *Earth, Planets and Space*. 2002. Vol. 54. P. 71–79. DOI: [10.1186/BF03352423](https://doi.org/10.1186/BF03352423).

Behlchaki 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. P. 1041–1056. DOI: [10.1016/j.asr.2016.11.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.031).

Bilitza D. Evaluation of the IRI-2007 model options for the topside electron density. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 44, no. 6. P. 701–706. DOI: [10.1016/j.asr.2009.04.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.04.036).

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. In: Liliensten J. (ed.), *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).

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_2F_2 independent on geomagnetic activity. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21, no. 5. P. 1167–1176.

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).

Habarulema J.B., Okoh D., Bergeot N., et al. Interhemispheric comparison of the ionosphere and plasmasphere total

electron content using GPS, radio occultation and ionosonde observations. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 68, iss. 6. P. 2339–2353. DOI: [10.1016/j.asr.2021.05.004](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.05.004).

Huang C.M. Disturbance dynamo electric fields in response to geomagnetic storms occurring at different universal times. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118. P. 496–501. DOI: [10.1029/2012JA018118](https://doi.org/10.1029/2012JA018118).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005. *Radio Sci.* 2011. RS0D03. DOI: [10.1029/2010RS004590](https://doi.org/10.1029/2010RS004590).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., et al. The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55, no. 8. P. 2077–2085. DOI: [10.1016/j.asr.2014.06.027](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.027).

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

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.

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).

Mayr H.G., Volland H. Magnetic storm effects in the neutral composition. *Planet. Space Sci.* 1972. Vol. 20. P. 379.

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).

Prol F.S., Hoque M.M., Ferreira A.A. Plasmasphere and topside ionosphere reconstruction using METOP satellite data during geomagnetic storms. *J. Space Weather Space Clim.* 2021. Vol. 11, no. 5. DOI: [10.1051/swsc/2020076](https://doi.org/10.1051/swsc/2020076).

Prölss G.W. Ionospheric F-region storms / In: Volland H. (ed.), *Handbook of atmospheric electrodynamics*. CRC Press, Boca Raton. 1995. Vol. 2, Ch. 8. P. 195–248.

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).

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

Seaton M.J. A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956. Vol. 8. P. 122.

Shpynev B.G., Khabituev D.S. Estimation of the plasmasphere electron density and O+/H+ transition height Irkutsk incoherent scatter data and GPS total electron content. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 119. P. 223–228. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.01.007).

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 Clim.* 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).

Yasyukevich A.S., Yasyukevich Yu.V., Klimenko M.V., Vesnin A.M. Plasmasphere Contribution to Total Electron Content at High and Middle Latitudes. *Proc. URSI GASS 2020*, Rome, Italy, 29 Aug – 5 Sep 2020. PID6354063. <https://www.ursi.org/proceedings/procGA20/papers/PID6354063.pdf>.

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data. *Results Physics.* 2015. Vol. 5. P. 32–33. DOI: [10.1016/j.rinp.2014.12.006](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006).

Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D., et al. Global plasmaspheric TEC and its relative contribution to GPS TEC. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70. P. 1541–1548. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.04.022](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.04.022).

URL: <http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2> (дата обращения 15 марта 2023 г.).

URL: <http://www.intermagnet.org> (дата обращения 20 февраля 2023 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 2 февраля 2023 г.).

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 2 июня 2023 г.).

URL: <https://giro.uml.edu/ionoweb> (дата обращения 2 июня 2023 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 2 июня 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

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. 108–120. DOI: [10.12737/szf-94202313](https://doi.org/10.12737/szf-94202313).