

## Долготные вариации ионосферных и геомагнитных параметров в северном полушарии во время сильных магнитных бурь 2015 г.

М. А. Черниговская<sup>1</sup>, Б. Г. Шпынев<sup>1</sup>, Д. С. Хабитуев<sup>1</sup>, К. Г. Ратовский<sup>1</sup>,  
А. Ю. Белинская<sup>2</sup>, А. Е. Степанов<sup>3</sup>, В. В. Бычков<sup>4</sup>, С. А. Григорьева<sup>5</sup>,  
В. А. Панченко<sup>6</sup>, Д. Коуба<sup>7</sup>, Й. Мелич<sup>8</sup>

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия  
E-mail: cher@iszf.irk.ru*

<sup>2</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН  
Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>3</sup> *Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера  
СО РАН, Якутск, 677980, Россия*

<sup>4</sup> *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН, с. Паратунка, 684034, Россия*

<sup>5</sup> *Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН  
Екатеринбург, 620016, Россия*

<sup>6</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н. В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, 108840, Россия*

<sup>7</sup> *Институт физики атмосферы ЧАН, Прага, 14131, Чешская Республика*

<sup>8</sup> *Институт атмосферной физики им. Лейбница, Кюлунгсборн, 18225, Германия*

В работе исследованы ионосферные эффекты сильных геомагнитных бурь на основе совместного анализа долготно-временных вариаций геомагнитных и ионосферных параметров во время двух самых сильных магнитных бурь текущего 24-го цикла солнечной активности — в марте и июне 2015 г. Для исследования вариаций геомагнитного поля использовались данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET в северном полушарии. Получены новые интересные результаты о нерегулярной структуре долготной изменчивости компонент геомагнитного поля в спокойных условиях, обусловленной несовпадением северного географического и геомагнитного полюсов, а также наличием аномалий различных пространственных масштабов в фоновом магнитном поле Земли. Долготно-временные вариации компонент геомагнитного поля в возмущённых условиях проявляют также сильную зависимость от индивидуальных особенностей развития магнитных бурь. Проанализированы долготно-временные вариации параметров среднеширотной ионосферы над евразийским континентом на основе данных сети ионозондов во время развития двух сильных магнитных бурь в 2015 г. Наличие долготных особенностей фоновой структуры и вариаций геомагнитного поля приводят к тому, что регистрируемые ионосферные эффекты также проявляют выраженную долготную неоднородность. Предполагается, что ионосферный отклик на магнитные бури связан с возмущениями в нижней термосфере вследствие усиления авроральной электроструи, приводящего к росту скорости нейтрального ветра и турбулентности. Это, в свою очередь, вызывает подъём молекулярного газа и уменьшает электронную концентрацию в верхней ионосфере.

**Ключевые слова:** цепь ионозондов, ионосферные возмущения, вариации геомагнитного поля, геомагнитная буря

Одобрена к печати: 04.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347

### Введение

Ионосфера как ионизированная часть атмосферы является очень важной областью в системе взаимодействия «Солнце – Земля». Понимание электродинамических процессов, протекающих в ионосферной плазме, очень важно для объяснения механизмов передачи и трансформации энергии от Солнца через земную магнитосферу в ионосферу и далее к Земле. Наиболее

ярким примером спорадического влияния Солнца на Землю являются геомагнитные бури, которые развиваются в магнитосфере в результате проявления солнечной активности. Геомагнитные бури вызывают целый комплекс эффектов в ионосфере (ионосферные бури), существенно изменяя её параметры и, как следствие, условия распространения радиоволн. Накопленные более чем за восемьдесят лет данные наземных радиофизических измерений, а также относительно новые методы спутниковых измерений атмосферных и ионосферных параметров представляют научный базис для современного понимания процессов ионосферных бурь. Подробная классификация эффектов геомагнитных бурь в ионосфере, зарегистрированных по данным наземных наблюдений, дана в обзоре (Buonsanto, 1999). Автором обсуждается роль различных факторов в развитии ионосферных бурь, таких как распространение эффектов бурь по широте и долготе, проникновение электрических полей из высоких широт в низкие, усиление направленного к экватору термосферного ветра, а также «сумеречное» повышение электронной плотности в средних широтах (см. также (Buonsanto, 1995; Foster, 1993; Hocke, Schlegel, 1996; Tashchilin, Romanova, 2011)). Комплексный анализ по данным мировой сети станций некогерентного рассеяния с целью выявления глобальных эффектов магнитных бурь в ионосфере проведён в работе (Goncharenko et al., 2005). Развитие технологий использования GPS-приёмников (Global Positioning System, система глобального позиционирования) для целей ионосферных исследований значительно увеличило возможности глобального изучения эффектов геомагнитных бурь в ионосфере. Использование данных приёмников GPS/ГЛОНАСС мировой сети IGS (International GNSS Service, международная геодинамическая сеть для предоставления данных высокого качества стандарта GNSS — Global Navigation Satellite Systems, ГНСС — спутниковая система навигации) вместе с совершенствованием моделей глобальной атмосферной циркуляции обеспечивает возможность предсказывать эффекты воздействия сильных геомагнитных возмущений на состояние ионосферы (Afraimovich et al., 1998; Fuller-Rowell et al., 1994; Laštovička, 2002; Lu et al., 1998). Модели и экспериментальные наблюдения дополняют друг друга и улучшают понимание природы ионосферных эффектов геомагнитных бурь.

В работе выполнено экспериментальное исследование пространственно-временных вариаций параметров ионосферы, связанных с возмущениями в магнитосфере Земли, которые определяются в первую очередь проявлениями солнечной активности на основе данных радиофизических измерений с помощью цепи среднеширотных ионозондов. Вследствие недостаточного пространственного и временного разрешения использование спутниковых данных для изучения региональных особенностей проявлений ионосферных возмущений различной природы часто бывает крайне затруднительным или невозможным. В связи с этим выполнение регулярных наземных измерений для получения объективной информации о характеристиках ионосферы в режиме непрерывного мониторинга с высоким временным разрешением не теряет своей актуальности. Ещё большую научную ценность приобретают сети измерительных приборов (предпочтительно одной технической модификации) с возможностью длительной синхронной регистрации геофизических параметров в обширной области пространства для изучения не только временных, но и пространственных особенностей развития изучаемых процессов.

В работе (Shpynev et al., 2018) на основе данных евразийской цепи среднеширотных ионозондов и данных мировой сети магнитометров были получены первые результаты анализа долготных неоднородностей ионосферных возмущений во время геомагнитной бури. Установлено, что различия в ионосферном отклике были связаны с долготной асимметрией в вариациях компонент геомагнитного поля (ГМП) (Шпынев и др., 2018).

## Данные измерений ионосферных и геомагнитных параметров

В настоящей работе выполнен совместный анализ данных евразийской цепи ионозондов, расположенных в диапазоне широт  $50\text{--}60^\circ$  с.ш. с интервалом  $15\text{--}20^\circ$  по долготе в секторе  $13\text{--}158^\circ$  в.д., и данных глобальной сети магнитометров INTERMAGNET.

Евразийскую цепь составляли три российских ионозонда типа «Парус» различных модификаций (Krasheninnikov et al., 2010) и пять цифровых ионозондов DPS-4 (Reinisch et al., 1997). Названия станций, координаты (обозначены белыми кружками на *рис. 1*) и типы ионозондов приведены в *табл. 1*. Для анализа отклика ионосферы на вариации ГМП использовались данные о среднечасовых значениях критической частоты ( $f_oF2$ ), высоты максимума ( $h_mF2$ ) ионосферы, критической частоты слоя  $E_s$  ( $f_oE_s$ ) и минимальной частоты отражения ( $f_{min}$ ).

Таблица 1. Станции цепи ионозондов

Станция	Географические координаты (с. ш., в. д.)	Тип ионозонда
Юлиусру	55°, 13°	DPS-4
Пругонице	50°, 15°	DPS-4
Москва	56°, 37°	DPS-4
Екатеринбург	57°, 60°	«Парус 3.0»
Новосибирск	55°, 83°	«Парус 1.0»
Иркутск	52°, 104°	DPS-4
Якутск	62°, 130°	DPS-4
Паратунка	53°, 158°	«Парус 2.0»



Рис. 1. Схема расположения цепи российских и европейских ионозондов и магнитометров

Для восстановления пространственной структуры и временных вариаций ГМП использовались данные глобальной сети магнитометров INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>), а также данные высокоширотных обсерваторий ([https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/)). Пункты геомагнитных наблюдений были разбиты на две цепи (см. *рис. 1*): высокоширотная — вдоль  $\sim 70^\circ$  с. ш. (12 магнитометров, обозначены кружками красного цвета) и среднеширотная — вдоль  $\sim 55^\circ$  с. ш. (14 магнитометров, обозначены кружками голубого цвета).

## Результаты анализа и обсуждения

Наше предыдущее исследование бури Св. Патрика в марте 2015 г. (Shpynev et al., 2018) показало, что ионосферный эффект от большой геомагнитной бури может продолжаться несколько суток вследствие формирования в нижней термосфере крупномасштабного волнообразного возмущения с высокой концентрацией молекулярного газа. Это возмущение образуется вследствие того, что во время сильных геомагнитных возмущений область высыпаний энергичных частиц в ночной ионосфере смещается на средние широты. Возникающий при этом сильный западный электроджет увлекает молекулярные частицы из нижней термосферы, поднимая их в виде волны или вихрей на высоты ионосферы.

Для дальнейшего исследования данного эффекта в настоящей работе выполнен совместный анализ долготно-временных вариаций геомагнитных и ионосферных параметров во

время двух самых сильных магнитных бурь текущего 24-го цикла солнечной активности — в марте и июне 2015 г.

**Вариации геомагнитного поля.** Обе бури были «очень сильными» по классификации бурь по планетарному индексу  $D_{st}$  (Loewe, Pröls, 1997). По классификации NASA бури также относились к классу G4 («очень сильная»).

В марте 2015 г. магнитная буря началась 17 числа (по дню начала буря названа именем св. Патрика). Согласно информации, размещённой по ссылке [www.solen.info/solar/old\\_reports/](http://www.solen.info/solar/old_reports/) и основанной на данных спутника SOHO, буря развивалась в результате взаимодействия магнитосферы Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра из четырёх корональных дыр и выбросом корональной массы, сопровождавшим относительно слабую рентгеновскую вспышку класса C9.1, зарегистрированную 15 марта 2015 г. Главная фаза бури продолжалась ~16,5 ч с 06:23 до 22:47 UT 17 марта 2015 г. В максимуме бури  $D_{st}$ -индекс понизился до  $-223$  нТл (рис. 2в);  $K_p$ -индекс возрастал от 5+ до 8–;  $A_p$ -индекс достиг 179 (по сведениям Мирового центра данных (МЦД) по геомагнетизму в Киото, Япония (World Data Center for Geomagnetism, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>)).

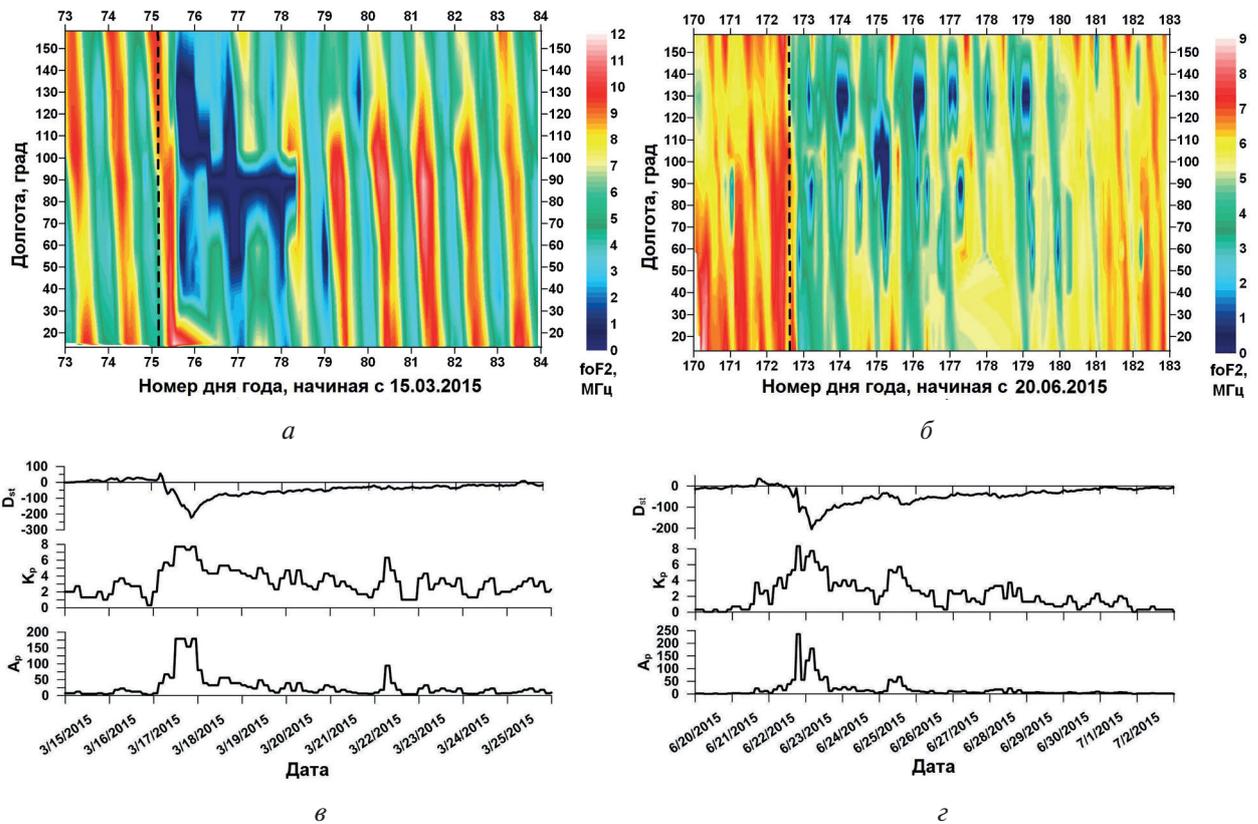


Рис. 2. Долготно-временные вариации  $f_oF_2$  (время UT) в период бури 15–25 марта 2015 г. (а) и 20 июня–2 июля 2015 г. (б). Вертикальные пунктирные линии отмечают внезапное начало бури (SSC). Нижние панели — временные вариации индексов геомагнитной активности  $D_{st}$ ,  $K_p$  и  $A_p$  в период бури 15–25 марта 2015 г. (в) и 20 июня–2 июля 2015 г. (г)

Вторая по интенсивности магнитная буря в текущем цикле солнечной активности началась в результате взаимодействия магнитосферы Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра, выбросами корональной массы и вспышки на Солнце класса M6.5 в 18:23 UT 22 июня 2015 г. ([www.solen.info/solar/old\\_reports/](http://www.solen.info/solar/old_reports/)). На Землю пришли фронты трёх межпланетных ударных волн различной интенсивности в период с 21 по 23 июня 2015 г. Фронт третьей, самой сильной ударной волны достиг магнитосферы Земли в 18:30 UT 22 июня, после чего началась геомагнитная буря класса G4, которая длилась много часов. В максимуме бури

$D_{st}$ -индекс понизился до  $-204$  нТл (рис. 2г),  $K_p$ -индекс возрос до  $8+$ ,  $A_p$  достиг 236 (по данным МЦД по геомагнетизму в Киото).

Результаты исследований гелиосферных, магнитосферных и ионосферных возмущений во время этих экстремальных бурь представлены также в работах (Astafyeva et al., 2015; 2017; 2018; Klimenko et al., 2018; Kunitsyn et al., 2016; Liu et al., 2018; Shpynev et al., 2018; Wu et al., 2016; Zolotukhina et al., 2017).

В наших предыдущих работах (Шпынев и др., 2018; Shpynev et al., 2018) была выявлена долготная неоднородность ионосферы над регионом Евразии, основная причина которой заключается в конфигурации геомагнитного поля. Вследствие несовпадения магнитного и географического полюсов, а также наличия аномалий различных пространственных масштабов в фоновом магнитном поле Земли в долготном распределении вариаций ГМП выделяются явно выраженные долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы.

На основе данных двух цепей магнитометров сети INTERMAGNET в средних и высоких широтах получены долготные распределения  $H$ - и  $Z$ -компонент ГМП для рассматриваемых событий магнитных бурь в спокойных и возмущённых условиях (рис. 3). Для анализа вариаций ГМП были рассчитаны для каждого часа стандартные отклонения значений  $H$ - и  $Z$ -компонент ГМП от соответствующих фоновых величин. Фоновые значения компонент ГМП определялись по данным, полученным в течение двух магнитоспокойных дней, предшествующих началу бури.

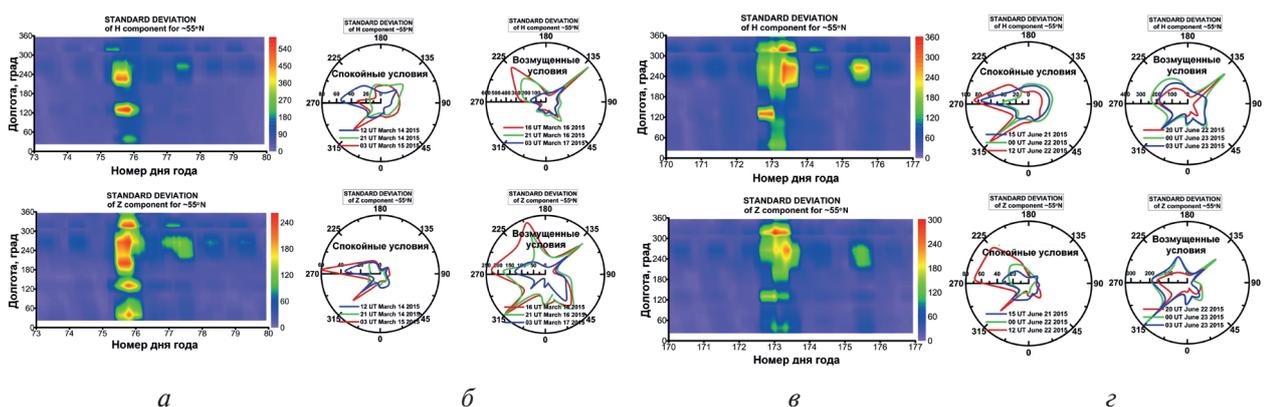


Рис. 3. Долготно-временные вариации дисперсий  $H$ - и  $Z$ -компонент ГМП на широте  $\sim 55^\circ$  с. ш. для бурь 15–21 марта 2015 г. (а) и 20 июня–26 июня 2015 г. (в) (время UT). Распределения дисперсий ГМП, показанные для спокойных (левый столбец) и возмущённых (правый столбец) условий в полярных координатах на широте  $\sim 55^\circ$  с. ш. для отдельных дней марта 2015 г. (б) и июня 2015 г. (г)

В долготном секторе  $\sim 90$ – $100^\circ$  в.д., симметричном расположенному в западном полушарии геомагнитному полюсу, уровень вариаций ГМП на средних широтах (см. рис. 3а, в) всегда самый низкий. В связи с этим над регионом Евразии на долготах  $\sim 90$ – $100^\circ$  ионосфера имеет устойчивую положительную аномалию и раньше всего восстанавливается после геомагнитных возмущений. Симметрично от этого сектора на долготах  $\sim 40^\circ$ ,  $\sim 130^\circ$  расположены две зоны усиленного проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт на средние. В этих секторах начинаются практически все сильные возмущения ГМП, несмотря на локальное время SSC магнитных бурь (внезапное начало бурь, *англ.* sudden storm commencement). Зоны проникновения геомагнитных возмущений хорошо видны как для равноденствия, так и для солнцестояния (см. рис. 3а, в и рис. 3б, г — правые столбцы для возмущённых условий). Им соответствуют области сильных отрицательных возмущений ионосферы, т. е. понижения  $f_oF_2$ , что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме  $F_2$  слоя ионосферы.

**Вариации ионосферных параметров.** На верхних панелях рис. 2 приведены долготно-временные вариации критической частоты  $F_2$  слоя ионосферы вдоль евразийской цепи сред-

неширотных ионозондов во время бури Св. Патрика 17–18 марта 2015 г. (см. *рис. 2а*) и бури 22–23 июня 2015 г. (см. *рис. 2б*). Ниже приведены планетарные индексы  $D_{st}$ ,  $K_p$  и  $A_p$  за соответствующие временные интервалы измерений (см. *рис. 2в, з*). Для анализа вариаций ионосферных параметров в периоды развития бурь рассматриваются интервалы 11 сут (15–25 марта 2015 г.) и 13 сут (20 июня – 2 июля 2015 г.), чтобы оценить время полного восстановления ионосферы к невозмущённым условиям. В качестве окончания интервала анализа выбирается время перехода индекса  $D_{st}$  от отрицательных значений к положительным. Следует обратить внимание, что бури происходили в условиях весеннего равноденствия и летнего солнцестояния. Для этих сезонов характерны различные особенности регулярных вариаций ионосферных параметров.

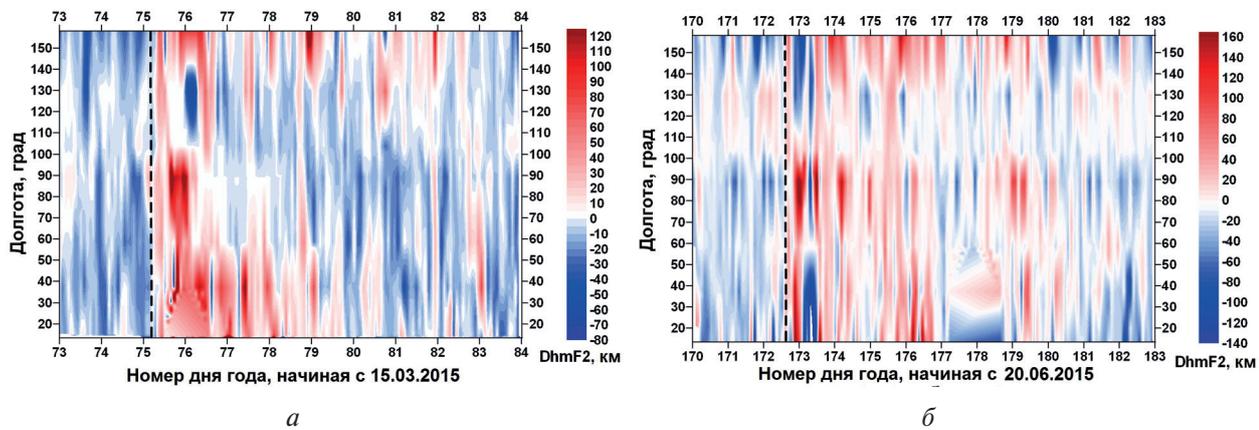
Для обеих рассматриваемых сильных бурь полная длительность ионосферного возмущения составляла ~9 сут. Разница воздействия на ионосферу состояла только в фоновых условиях ионосферы. В марте существует выраженный переход от дневных условий к ночным. В июне такой переход выражен очень слабо, поскольку на высотах ионосферы Солнце в этот период практически не заходит. Вариации индекса  $D_{st}$  (см. *рис. 2в, з*) для обоих событий бурь были почти идентичными, что позволяет исследовать разницу протекания бурь в условиях равноденствия и летнего солнцестояния. Как видно из графиков вариаций индексов  $K_p$  и  $A_p$ , в период восстановительной фазы бурь наблюдалась дополнительная суббуревая активность со значениями индекса  $K_p > 4$  (см. *рис. 2в, з*). В этой связи у нас появляется возможность сравнить воздействие супербури и суббури при одних и тех же ионосферных условиях.

Цепь среднеширотных ионозондов охватывает только Евразийский континент, и, к сожалению, в западном полушарии в средних широтах Североамериканского континента ионозонды отсутствуют. Поэтому мы не можем с уверенностью сказать о локализации аналогичных ионосферных областей в западном полушарии. Однако из долготных распределений вариаций ГМП можно предположить, что на долготах вблизи ~225 и ~315° могут располагаться зоны сильных вариаций ионосферных параметров. Очевидно, что ещё одна, пятая, активная зона находится на долготе геомагнитного полюса ~270°. В зависимости от того, какая из этих активных зон находится ближе к вечернему сектору, на ту зону и приходится основная фаза ионосферного возмущения во время магнитной бури. Также по аналогии можно предположить существование в западном полушарии между активными зонами областей с относительно низким уровнем вариаций ионосферных параметров на меридианах ~0 и ~180°.

На *рис. 2а, б* пунктирной линией обозначены моменты SSC, вызванные воздействием межпланетной ударной волны на магнитосферу Земли. Суточные вариации критических частот слоя  $F_2$  слева от этих линий дают представление о типичных вариациях данного параметра в спокойных геомагнитных условиях. В условиях равноденствия (см. *рис. 2а*) наблюдается ярко выраженный переход день – ночь в вариациях  $f_oF_2$ . Несмотря на то, что широта ионозондов в цепи варьируется в пределах 50–62° с.ш., все ионозонды показывают практически идентичные значения и вариации параметра  $f_oF_2$ . Наклон суточных максимумов  $f_oF_2$  соответствует разнице в локальном времени для каждого ионозонда. В условиях летнего солнцестояния (см. *рис. 2б*) суточные вариации критических частот составляют всего 1–2 МГц с двумя максимумами. Один максимум связан с утренним нагревом после восхода Солнца. Второй — с ночным подъёмом ионизации вследствие изменения скорости термосферного нейтрального ветра, который днём имеет сильную северную меридиональную компоненту и увлекает ионизацию вниз. После захода Солнца в экваториальной ионосфере термосферный нейтральный ветер ослабевает или даже меняет направление на южное, поднимая среднеширотную ионосферу.

Для обоих событий через несколько часов после момента SSC происходит резкое уменьшение критических частот на 5–7 МГц относительно значений в спокойные дни, предшествовавшие началу магнитной бури. Минимум  $f_oF_2$  совпадает с минимумом  $D_{st}$ , что связано с приходом на средние широты зоны магнитосферной конвекции. В средние широты перемещаются силовые трубки ГМП с большим  $L$  (расстояние до вершины геомагнитной силовой линии в земных радиусах) и низким содержанием плазмы. Ионосферная плазма быстро вытекает вверх, уменьшая  $f_oF_2$  и увеличивая высоту максимума ионизации.

На *рис. 4* приведены вариации высот максимума слоя  $F2$  для исследуемых событий. В данном случае мы рассматриваем не сами значения  $h_m F2$ , а их отклонения от фонового уровня  $\Delta h_m F2$ , чтобы исключить неоднозначность определения этого параметра на ионозонах разного типа. Фоновые величины вычислялись усреднением значений  $h_m F2(t)$  скользящим средним на интервале сглаживания  $(t - 14, t + 14)$  дней до и после каждого часа  $t$  текущего дня. Затем из временных рядов ежечасных исходных данных  $h_m F2(t)$  рассчитывались ряды отклонений от фонового уровня. Сравнение двух событий показывает очень интересный эффект, связанный с нахождением среднеширотной ионосферы в зоне силовых трубок ГМП с большим  $L$ . В равноденствие за всё время главной фазы бури ( $D_{st} < -100$ ) максимум  $h_m F2$  поднимается на 60–100 км за счёт постоянного оттока плазмы вверх и остаётся на этих высотах в течение суток и более. Данный эффект известен в литературе как “dusk enhancement” (Vuonsanto, 1995). В летней ионосфере в ночные часы также наблюдается резкий подъём максимума ионизации на ~100 км. Однако днём вследствие высокой скорости ионизации максимум ионизации формируется в нижней ионосфере на высотах 180–200 км, несмотря на продолжающийся отток плазмы в плазмосферу.



*Рис. 4.* Долготно-временные вариации  $\Delta h_m F2$  (время UT) в период бури 15–25 марта 2015 г. (*a*) и 20 июня – 2 июля 2015 г. (*б*)

В нашей предыдущей работе при анализе ионосферных эффектов бури Св. Патрика в марте 2015 г. (Shpynev et al., 2018) было показано, что во время главной фазы бури формируется область низкой концентрации, которая в течение трёх дней перемещается из зоны основного возмущения на долготу ~130° на запад со скоростью 50–70 м/с. Такой продолжительный во времени и необычный эффект магнитной бури в ионосфере поставил естественный вопрос о физическом механизме наблюдаемого явления. Был рассмотрен очевидный механизм, состоящий в том, что ионосферный отклик на сильную геомагнитную бурю связан с возмущениями в нижней термосфере, вызванными нагревом газа авроральными электропотоками. Известно, что этот нагрев вызывает увеличение скорости нейтрального ветра и усиление турбулентности в нижней ионосфере. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в области  $F$  ионосферы (Danilov, 2003; Klimenko et al., 2011; Laštovička, 2006; Liou et al., 2005; Pröls, Werner, 2002). Этот эффект виден как перемещение зоны низкой концентрации между днями 76-м и 79-м на *рис. 2a*.

В летней ионосфере вследствие большой длительности светлого времени суток восстановление фоновой концентрации происходит достаточно быстро, но похожие эффекты также наблюдаются. На *рис. 2б* данный эффект можно видеть как перемещение зоны низкой концентрации в день 174-й с долготы ~130° на долготу ~110° и далее до 60°, т.е. из Якутска до Новосибирска и Екатеринбурга. Также видны аналогичные, менее выраженные пары отрицательных возмущений с начальным возмущением ионизации на ~130° и откликом на ~80°. Промежуток времени между возмущением и откликом почти постоянный и состав-

ляет чуть более суток (24–26 ч). При расстоянии от Якутска до Новосибирска 2700 км оценка скорости перемещения этих возмущений даёт 30–40 м/с.

Последней особенностью протекания геомагнитного возмущения в период летнего солнцестояния является высокая вероятность образования спорадических слоёв  $E_s$ . При этом появление  $E_s$  чаще всего происходит на долготах  $\sim 60^\circ$ – $110^\circ$  на ионозондах в Екатеринбурге, Новосибирске и Иркутске, т.е. в долготном секторе, где уровень вариаций ГМП низкий (рис. 5).

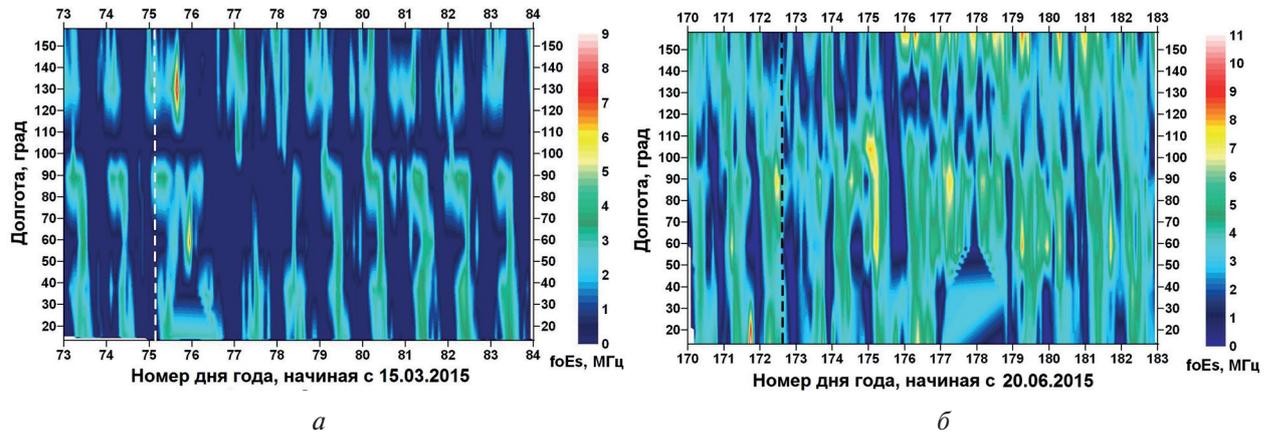


Рис. 5. Долготно-временные вариации  $f_oE_s$  (время UT) в период бури 15–25 марта 2015 г. (а) и 20 июня – 2 июля 2015 г. (б)

## Выводы

Исследование ионосферного отклика экстремальных геомагнитных бурь в марте и июне 2015 г. показывает схожий сценарий развития возмущений над территорией Евразии и сильную зависимость развития возмущения от характеристик геомагнитного поля. Во время главной фазы бури долготная динамика возмущений является почти синхронной и связана с глобальным перемещением на средние широты зоны магнитосферной конвекции. На фазе восстановления важную роль в динамике ионосферы играют возмущения в виде термосферных волн молекулярного газа, которые формируются западным электроджетом и распространяются в юго-западном направлении. Для события в марте 2015 г. распространение такого возмущения наблюдалось в течение трёх дней со скоростью 50–70 м/с. Летом при большой продолжительности светового дня ионизация восстанавливается быстрее, чем в равноденствие. Отрицательные ионосферные возмущения наблюдаются в пределах одних суток и распространяются на запад со скоростью 30–40 м/с. Динамика высоты максимума ионизации также существенно различается для двух сезонов. Весной после начала бури и резкого подъёма  $h_m F2$  (dusk enhancement) максимум остаётся на высоком уровне в течение всей главной фазы бури. Летом после резкого подъёма  $h_m F2$  достаточно быстро происходит восход Солнца, что формирует новый максимум на высотах нижней термосферы, т.е. измеряемая ионозондами высота максимума уменьшается по сравнению с невозмущёнными условиями.

Работа частично выполнена при поддержке проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00681. Методы программной обработки данных получены в рамках базового финансирования программ фундаментальных научных исследований П.12 и П.16 (Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (ИСЗФ СО РАН)), № 0331-2019-0013 (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН). Экспериментальные данные частично получены с использованием оборудования Центров коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН)

и «Северо-восточный гелиогеофизический центр» СКР\_558279 (Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН); НИОКТР АААА-А18-118020790004-0 (Институт геофизики Уральского отделения РАН).

## Литература

1. Шпынев Б. Г., Хабитуев Д. С., Черниговская М. А. Исследование причин долготных неоднородностей ионосферных возмущений в северном полушарии во время геомагнитных бурь // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 241–250. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-241-250.
2. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1998. V. 60. P. 1205–1223.
3. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophysical Research Space Physics. 2015. V. 120. P. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.
4. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J. D., Doornbos E., van den Ijssel J. Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling // J. Geophysical Research Space Physics. 2017. V. 122. P. 11716–11742. DOI:10.1002/2017JA024174.
5. Astafyeva E., Zakharenkova I., Hozumi K., Alken P., Coïsson P., Hairston M. R., Coley W. R. Study of the equatorial and low-latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques // J. Geophysical Research Space Physics. 2018. V. 123. P. 2424–2440. DOI: 10.1002/2017JA024981.
6. Buonsanto M. J. A case study of the ionospheric storm dusk effect // J. Geophysical Research. 1995. V. 100. No. A12. P. 23857–23869. DOI: 10.1029/95JA02697.
7. Buonsanto M. J. Ionospheric storms — a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.
8. Danilov A. D. Long-term trends of  $f_oF2$  independent on geomagnetic activity // Annales Geophysicae. 2003. V. 21. No. 5. P. 1167–1176.
9. Foster J. C. Storm time plasma transport at middle and high latitudes // J. Geophysical Research. 1993. V. 98. P. 1675–1689.
10. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 3893–3914.
11. Goncharenko L. P., Salah J. E., van Eyken A., Howells V., Thayer J. P., Taran V. I., Shpynev B., Zhou Q., Chan J. Observations of the April 2002 geomagnetic storm by the global network of incoherent scatter radars // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. No. 1. P. 163–181.
12. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Annales Geophysicae. 1996. V. 14. P. 917–940.
13. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Goncharenko L. P., Fagundes R. R., de Jesus R., de Abreu A. J., Vesnin A. M. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and lowlatitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Science. 2011. RS0D03. DOI: 10.1029/2010RS004590.
14. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Despirak I. V., Zakharenkova I. E., Kozelov B. V., Cherniakov S. M., Andreeva E. S., Tereshchenko E. D., Vesnin A. M., Korenkova N. A., Gomonov A. D., Vasiliev E. B., Ratovsky K. G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 78–92. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.
15. Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // Computers and Geosciences. 2010. V. 36. P. 628–635. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.09.013.
16. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Kurbatov G. A., Yasyukevich Yu. V., Morozov Yu. V. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites // GPS Solutions. 2016. V. 20. P. 877–884. DOI: 10.1007/s10291-015-0500-2.
17. Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather — Effects of geomagnetic storms // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002. V. 64. P. 697–705. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00031-7.
18. Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. P. 479–497. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.01.018.
19. Liou K., Newell P. T., Anderson B. J., Zanetti L., Meng C.-I. Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.

20. Liu Y., Fu L., Wang J., Zhang C. Studying Ionosphere Responses to a Geomagnetic Storm in June 2015 with Multi-Constellation Observations // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. P. 666–686. DOI: 10.3390/rs10050666.
21. Loewe C.A., Pröls G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. No. A7. P. 14209–14213.
22. Lu G., Pi X., Richmond A.D., Roble R.G. Variations of total electron content during geomagnetic disturbances: a model/observation comparison // *Geophysical Research Letters*. 1998. V. 25. P. 253–256.
23. Pröls G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // *J. Geophysical Research Space Physics*. 2002. V. 107. No. A2. P. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.
24. Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L. Ionospheric sounding support of OTH radar // *Radio Science*. 1997. V. 32. No. 4. P. 1681–1694.
25. Shpynev B.G., Zolotukhina N.A., Polekh N.M., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Mielich J. The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. V. 180. P. 93–105. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
26. Tashchilin A.V., Romanova E.B. Role of magnetospheric convection and precipitation in the formation of the “Dusk Effect” during main phase of a magnetic storm // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011. V. 51. No. 4. P. 468–474.
27. Wu C.C., Liou K., Lepping R.P., Hutting L., Plunkett S., Howard R.A., Socker D. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick’s day event (17 March 2015)” // *Earth, Planets and Space*. 2016. Vol. 68. P. 151. DOI: 10.1186/s40623-016-0525-y.
28. Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Rogov D., Romanova E., Chelpanov M. Ionospheric effects of St. Patrick’s storm over Asian Russia: 17–19 March 2015 // *J. Geophysical Research Space Physics*. 2017. V. 122. P. 2484–2504. DOI: 10.1002/2016JA023180.

## Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters during severe magnetic storms in 2015

M.A. Chernigovskaya<sup>1</sup>, B.G. Shpynev<sup>1</sup>, D.S. Khabituev<sup>1</sup>, K.G. Ratovsky<sup>1</sup>,  
A.Yu. Belinskaya<sup>2</sup>, A.E. Stepanov<sup>3</sup>, V.V. Bychkov<sup>4</sup>, S.A. Grigorieva<sup>5</sup>,  
V.A. Panchenko<sup>6</sup>, D. Kouba<sup>7</sup>, J. Mielich<sup>8</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia  
E-mail: cher@iszf.irk.ru*

<sup>2</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS  
Novosibirsk 630090, Russia*

<sup>3</sup> *Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS  
Yakutsk 677980, Russia*

<sup>4</sup> *Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS  
Paratunka 684034, Russia*

<sup>5</sup> *Bulashevich Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg 620016, Russia*

<sup>6</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation  
RAS, Moscow, Troitsk 108840, Russia*

<sup>7</sup> *Institute of Atmospheric Physics CAS, Prague 14131, Czech Republic*

<sup>8</sup> *Leibniz Institute for Atmospheric Physics, Kühlungsborn 18225, Germany*

We study the ionospheric effects of geomagnetic storms on the basis of analysis of longitudinal-temporal variations of geomagnetic and ionospheric parameters during two severe magnetic storms of the current 24<sup>th</sup> solar activity cycle, in March and June 2015. To study the variations of the geomagnetic field, the data of the global network of magnetometers INTERMAGNET in the Northern hemisphere

were used. New interesting results are obtained on the irregular structure of the longitudinal variability of the geomagnetic field components in quiet conditions due to the discrepancy between the North geographical and geomagnetic poles, as well as the presence of anomalies of different spatial scales in the background magnetic field of the Earth. The longitudinal-temporal variations of the geomagnetic field components under disturbed conditions also show a strong dependence on the individual features of the magnetic storms. The longitudinal-temporal variations of the parameters of the mid-latitude ionosphere over the Eurasian continent were studied on the basis of the ionosonde chain data on the case study of the development of two severe magnetic storms in 2015. The presence of longitudinal features of the background structure and variations of the geomagnetic field leads to the fact that the registered ionospheric effects also exhibit a significant longitudinal inhomogeneity. We assume that the ionospheric response to magnetic storms is associated with disturbances in the lower thermosphere due to the strengthening of the auroral electrojet, leading to an increase in the neutral wind velocity and turbulence. This, in turn, causes the uplift the molecular gas to the ionospheric heights and reduces the electron concentration in the upper ionosphere.

**Keywords:** ionosonde chain, ionospheric disturbances, geomagnetic field variations, geomagnetic storm

Accepted: 04.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347

## References

1. Shpynev B. G., Khabituiev D. S., Chernigovskaya M. A., Issledovanie prichin dolgotnykh neodnorodnostei ionosfernykh vozmushchenii v severnom polusharii vo vremya geomagnitnykh bur' (A study of the causes of longitudinal irregularities of ionospheric disturbances in the Northern Hemisphere during the magnetic storms), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 241–250, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-241-250.
2. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, Vol. 60, pp. 1205–1223.
3. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M., Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2015, Vol. 120, pp. 9023–9037, DOI: 10.1002/2015JA021629.
4. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J. D., Doornbos E., van den Ijssel J., Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2017, Vol. 122, pp. 11716–11742, DOI: 10.1002/2017JA024174.
5. Astafyeva E., Zakharenkova I., Hozumi K., Alken P., Coisson P., Hairston M. R., Coley W. R., Study of the equatorial and low-latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2018, Vol. 123, pp. 2424–2440, DOI: 10.1002/2017JA024981.
6. Buonsanto M. J., A case study of the ionospheric storm dusk effect, *J. Geophysical Research*, 1995, Vol. 100, No. A12, pp. 23857–23869, DOI: 10.1029/95JA02697.
7. Buonsanto M. J., Ionospheric storms — a review, *Space Science Reviews*, 1999, Vol. 88, pp. 563–601.
8. Danilov A. D., Long-term trends of  $f_oF2$  independent on geomagnetic activity, *Annales Geophysicae*, 2003, Vol. 21, No. 5, pp. 1167–1176.
9. Foster J. C., Storm time plasma transport at middle and high latitudes, *J. Geophysical Research*, 1993, Vol. 98, pp. 1675–1689.
10. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S., Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, pp. 3893–3914.
11. Goncharenko L. P., Salah J. E., van Eyken A., Howells V., Thayer J. P., Taran V. I., Shpynev B., Zhou Q., Chan J., Observations of the April 2002 geomagnetic storm by the global network of incoherent scatter radars, *Annales Geophysicae*, 2005, Vol. 23, No. 1, pp. 163–181.
12. Hocke K., Schlegel K., A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995, *Annales Geophysicae*, 1996, Vol. 14, pp. 917–940.
13. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Goncharenko L. P., Fagundes R. R., de Jesus R., de Abreu A. J., Vesnin A. M., Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and lowlatitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, *Radio Science*, 2011, RS0D03, DOI: 10.1029/2010RS004590.
14. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Despirak I. V., Zakharenkova I. E., Kozelov B. V., Cherniakov S. M., Andreeva E. S., Tereshchenko E. D., Vesnin A. M., Korenkova N. A., Gomono A. D., Vasiliev E. B., Ratov-

- sky K. G., Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 78–92, DOI: 0.1016/j.jastp.2017.12.017.
15. Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C., Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde, *Computers and Geosciences*, 2010, Vol. 36, pp. 628–635, DOI: 10.1016/j.cageo.2009.09.013.
  16. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Kurbatov G. A., Yasyukevich Yu. V., Morozov Yu. V., Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites, *GPS Solutions*, 2016, Vol. 20, pp. 877–884, DOI: 10.1007/s10291-015-0500-2.
  17. Laštovička J., Monitoring and forecasting of ionospheric space weather — Effects of geomagnetic storms, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, Vol. 64, pp. 697–705, DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00031-7.
  18. Laštovička J., Forcing of the ionosphere by waves from below, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, Vol. 68, pp. 479–497, DOI: 10.1016/j.jastp.2005.01.018.
  19. Liou K., Newell P. T., Anderson B. J., Zanetti L., Meng C.-I., Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, A05309, DOI: 10.1029/2004JA010840.
  20. Liu Y., Fu L., Wang J., Zhang C., Studying Ionosphere Responses to a Geomagnetic Storm in June 2015 with Multi-Constellation Observations, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, pp. 666–686, DOI: 10.3390/rs10050666.
  21. Loewe C. A., Prölss G. W., Classification and mean behavior of magnetic storms, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, No. A7, pp. 14209–14213.
  22. Lu G., Pi X., Richmond A. D., Roble R. G., Variations of total electron content during geomagnetic disturbances: a model/observation comparison, *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, pp. 253–256.
  23. Prölss G. W., Werner S., Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. A2, pp. 1016, DOI: 10.1029/2001JA900126.
  24. Reinisch B. W., Haines D. M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D. F., Sales G. S., Scali J. L., Ionospheric sounding support of OTH radar, *Radio Science*, 1997, Vol. 32, No. 4, pp. 1681–1694.
  25. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J., The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 93–105, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
  26. Tashchilin A. V., Romanova E. B., Role of magnetospheric convection and precipitation in the formation of the “Dusk Effect” during main phase of a magnetic storm, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 468–474.
  27. Wu C. C., Liou K., Lepping R. P., Hutting L., Plunkett S., Howard R. A., Socker D., The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick's day event (17 March 2015)”, *Earth, Planets and Space*, 2016, Vol. 68, pp. 151, DOI: 10.1186/s40623-016-0525-y.
  28. Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Rogov D., Romanova E., Chelpanov M., Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015, *J. Geophysical Research Space Physics*, 2017, Vol. 122, pp. 2484–2504, DOI: 10.1002/2016JA023180.