# Долготные вариации отклика среднеширотной ионосферы северного полушария на геомагнитную бурю в октябре 2016 г. с помощью мультиинструментальных наблюдений

М. А. Черниговская<sup>1</sup>, Б. Г. Шпынев<sup>1</sup>, А. С. Ясюкевич<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 аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, 677980, Россия

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

<sup>5</sup> Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, 620016, Россия

<sup>6</sup> Институт земного магнетизма 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

Выполнено мультиинструментальное исследование вариаций ионосферных и геомагнитных параметров в северном полушарии в период сильной магнитной бури в октябре 2016 г. на основе анализа данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов, средне- и высокоширотных цепей приёмников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров сети INTERMAGNET. Подтверждены проявления долготной неоднородности ионосферных эффектов, связанной с нерегулярной структурой долготной изменчивости компонент геомагнитного поля. Проведено сравнение сценариев развития ионосферных возмущений в условиях равноденствия в период сильной бури в октябре 2016 г. и экстремальной бури в марте 2015 г. На главной фазе магнитной бури в октябре 2016 г., также как и бури в марте 2015 г., наблюдался переход от положительного к отрицательному эффекту ионосферной бури. На фазе восстановления бури в октябре 2016 г. наибольшее падение ионизации отмечалось в зоне сильных вариаций компонент геомагнитного поля на долготах ~130° в.д. (по данным ионозонда Якутск) и ~40-60° в.д. (по данным ионозондов Москва, Екатеринбург). Над регионом Евразии на долготах ~80-110° в.д. (по данным ионозондов Новосибирск, Иркутск) ионосфера раньше других долготных зон начала восстанавливаться после геомагнитного возмущения ввиду низкого уровня вариаций компонент геомагнитного поля на этих долготах.

Ключевые слова: цепь ионозондов, цепь двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС, ионосферные возмущения, вариации геомагнитного поля, геомагнитная буря

Одобрена к печати: 21.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-305-317

#### Введение

Ионосфера — сильно изменчивая среда. Известно, что солнечная и геомагнитная активность оказывает наиболее сильное влияние на состояние ионосферной плазмы. Внешнее воздействие на ионосферу проявляется в изменчивости параметров ионосферы различных временных масштабов. Помимо хорошо изученных квазипериодических долговременных вариаций параметров ионосферы с периодами порядка цикла солнечной активности, в ионосфере также присутствуют нерегулярные короткопериодные возмущения, являющиеся результатом магнитосферно-ионосферного взаимодействия во время магнитных возмущений (Dudok de Wit, Watermann, 2009) или воздействия со стороны нижележащей нейтральной атмосферы (Laštovička, 2006).

В результате событий повышенной солнечной активности (солнечных вспышек, корональных выбросов массы (CMEs — *англ*. coronal mass ejections), высокоскоростных потоков из корональных дыр (CH HSSs – англ. coronal hole high speed streams)), происходит резкое увеличение скорости солнечного ветра. Вследствие сложных процессов взаимодействия высокоэнергетического солнечного ветра с геомагнитным полем (ГМП) происходят возмущения его напряжённости — геомагнитные бури, ставшие ярким проявлением гелио-геомагнитной активности. Магнитосферное электрическое поле резко возрастает. Высыпания солнечных энергичных частиц в высокоширотную ионосферу становятся экстремальными. Усиливаются токовые системы авроральных электроструй. Термосфера разогревается за счёт джоулева тепла авроральных токов и диссипации энергии высыпающихся из магнитосферы частиц. Во время геомагнитных бурь происходит интенсивное выделение энергии в магнитосфере и полярной ионосфере, что существенно изменяет химические и динамические/электродинамические процессы в глобальной системе «ионосфера – термосфера». Огромные поступления энергии и импульса в область высоких широт в период бури приводят к последующим изменениям электромагнитной конфигурации и перераспределению плотности ионосферной плазмы, газового состава нейтральной термосферы и динамики среднеширотной, низкоширотной и экваториальной атмосферы и ионосферы (Blanc, Richmond, 1980).

Реакция ионосферы на магнитосферно-ионосферное взаимодействие во время магнитной бури известна как ионосферная буря (Buonsanto, 1999; Prölss, 1995). Со времени открытия почти 90 лет назад атмосферные и ионосферные бури, связанные с геомагнитными бурями, изучались очень интенсивно (Hafstad, Tuve, 1929). Многолетние исследования ионосферы с помощью ионозондов, начавшиеся в середине 20-х гг. прошлого века — со времени изобретения этого прибора, создали богатую экспериментальную базу для классификации ионосферных бурь (Prölss et al., 1991). Авторы выделили пять основных типов ионосферных бурь в субавроральных широтах в зависимости от источника их происхождения. Дальнейшие исследования показали, что значительный вклад в динамику ионосферных бурь вносят также быстро проникающие электрические поля магнитосферного происхождения и поле «возмущённого динамо» термосферного происхождения (Huang, 2013).

Геомагнитная активность оказывает сильное влияние на ионосферу, которое отражается в изменениях профиля электронной концентрации, наиболее заметных в *F*-области. Ионосферные бури сопровождаются значительными вариациями критической частоты (f\_F2) F2-слоя ионосферы, которая пропорциональна пиковой электронной плотности F-области (Поляков и др., 1968). Во время возмущённых условий f<sub>o</sub>F2 может увеличиваться, но чаще наблюдается резкое уменьшение f<sub>o</sub>F2 по сравнению со значениями в спокойных условиях (соответственно положительные или отрицательные ионосферные бури) (Matsushita, 1959). Возникновение положительных и отрицательных эффектов ионосферных бурь проявляет сильную зависимость от местного времени, сезона, географического региона (Buonsanto, 1999; Burešová et al., 2007; Kuai et al., 2017; Mendillo, 2006; Prölss, 1995; Rishbeth, 1998). Отрицательные ионосферные бури имеют более плавный характер и длительную продолжительность. Они выступают доминирующей характеристикой в ионосферном отклике на усиление геомагнитной активности и, как правило, объясняются изменениями нейтрального состава и смещением области главного ионосферного провала (ГИП) к экватору (Prölss, 1995; Rishbeth, 1998). Положительные ионосферные бури обусловлены усилением направленных к экватору нейтральных ветров, возникающих в результате поступления энергии в авроральные широты в период магнитной бури (Prölss, 1995). Когда происходят положительные ионосферные бури, нейтральные ветры преобладают над изменением химического состава в средних широтах.

Сложность ионосферы как области околоземного космического пространства определяет не только сильная временная изменчивость, но и наличие пространственных неоднородностей ионизации различных масштабов (выраженная высотная слоистая структура, экваториальная аномалия, провалы ионизации в высокоширотной ионосфере).

Большинство исследований широтных или долготных зависимостей ионосферных откликов на геомагнитную активность часто ограничено конкретным широтно-долготным регионом, хотя есть исследования глобального распределения электронной плотности (Astafyeva et al., 2015; Dmitriev et al., 2013; Kuai et al., 2017; Kunitsyn et al., 2016; Mansilla, 2004). Многие из этих исследований выполнены, по понятным причинам, с использованием методов спутниковых измерений атмосферных и ионосферных параметров, в развитии которых в последнее время достигнут гигантский прогресс. Хотя есть исследования с использованием экспериментальных данных сетей наземных радиофизических станций или комплексные исследования, сочетающие данные наземных и спутниковых измерений. В подавляющем большинстве случаев исследования пространственно-временных вариаций ионосферных параметров наземными методами проводились с использованием экспериментальных данных с меридиональных цепей станций. Меридиональные цепи радиофизических инструментов применялись для исследования специфических особенностей распределений ионосферных параметров в области высоких, средних и низких широт (согласно классификации широтных свойств ионосферы), а также для сравнения характерных распределений ионосферных параметров в разных широтных зонах. Широтные вариации ионизации проявляются более явно и ярко, объяснение их более очевидно, особенно в случае анализа влияния гелио-геомагнитных возмущений на состояние ионосферы. По иному обстоит дело с изучением долготных вариаций в распределениях ионосферных параметров в спокойных и особенно в возмущённых геомагнитных условиях, связанных с распространением возмущений из высоких широт в средние (Dmitriev et al., 2013; Kuai et al., 2017; Li et al., 2018; Mansilla, 2004; Mansilla, Zossi, 2020; Wang, Zhang, 2017).

На предыдущем этапе исследований на основе данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов, а также средне- и высокоширотных цепей приёмников GPS/ГЛОНАСС (англ. Global Positioning System, система глобального позиционирования; ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система) и магнитометров сети INTERMAGNET был впервые проведён анализ ионосферных возмущений во время экстремальных магнитных бурь в марте и июне 2015 г. (Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018). При этом анализировались долготные вариации параметров ионосферы, поскольку наземные измерительные приборы располагались примерно на одинаковых широтах, но были разнесены по долготе. Основная причина установленных долготных вариаций параметров ионосферы заключалась в конфигурации основного магнитного поля Земли, а также несовпадении магнитного и географического полюсов (так называемые UT-вариации). Для среднеширотной ионосферы разность суточных уровней ионизации не является критичной, и наблюдаемые ионосферные вариации нельзя отнести к классическому UT-эффекту. Особенности таких пространственных вариаций требуют дальнейшего анализа и изучения для выяснения их причин и механизмов формирования. В настоящей работе продолжен анализ ионосферных эффектов магнитных бурь с использованием отработанной методики анализа геомагнитных и ионосферных данных для бури в октябре 2016 г.

### Данные экспериментальных измерений

В настоящей работе для анализа отклика ионосферы на геомагнитную бурю используются следующие данные: 1) о среднечасовых значениях критической частоты  $f_oF2$  ионосферы по измерениям цепи из восьми среднеширотных ионозондов (*puc. 1*, см. с. 308) с 15-минутным разрешением; 2) о значениях полного электронного содержания (ПЭС) по измерениям на среднеи высокоширотной цепях двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС (см. *puc. 1a*).

Евразийскую цепь составляли три российских ионозонда типа «Парус» различных модификаций и пять цифровых ионозондов DPS-4 (*англ*. Digisonde Portable Sounder) (обозначены белыми кружками на *puc*. 1).

Для восстановления пространственной структуры и временных вариаций геомагнитного поля использовались данные *H*- и *Z*-компонент напряжённости ГМП с одноминутным разрешением по измерениям на средне- и высокоширотной цепях магнитометров глобальной сети INTERMAGNET (http://www.intermagnet.org) (см. *рис. 16*). В качестве основного параметра для анализа изменчивости геомагнитного поля используется дисперсия данных H- и Z-компонент ГМП (стандартное отклонение относительно фоновых невозмущённых значений). В работах (Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018) приведено подробное описание расположения ионозондов, приёмников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров, а также методики обработки рядов исходных экспериментальных данных.



*Рис. 1.* Схемы расположения: *а* — цепей ионозондов (белые кружки) и приёмников GPS/ГЛОНАСС (красные и зелёные флажки); *б* — ионозондов (белые кружки) и магнитометров (красные и голубые метки)

Из схем расположения наземных измерительных станций (см. *рис. 1*), данные которых используются в исследовании, видно, что цепи приёмников GPS/ГЛОНАСС (см. *рис. 1a*) хорошо совпадают по географическому расположению с цепями магнитометров (см. *рис. 1б*) и ионозондов.

## Анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов

Анализируемая магнитная буря была вызвана выбросом корональной массы (*анел.* coronal mass ejection — CME) 8 октября 2016 г., слабая ударная волна от которого достигла Земли в 21:20 UT (*анел.* Universal Time, всемирное время) 12 октября 2016 г. (по данным PRF SWPC 2146 (*анел.* Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data; Space Weather Prediction Center, Национальный центр прогнозирования метеорологической погоды США) от 17.10.2016. Затем 13 октября 2016 г. в 21:05 UT последовала солнечная вспышка класса C1, а 16 октября зарегистрирован высокоскоростной поток из корональной дыры, который обычно слабо влияет на индекс  $D_{st}$ , но отражается в вариациях  $A_p$ - и  $K_p$ -индексов (*рис. 2*, см. с. 309).

Магнитная буря 12–20 октября 2016 г. была «сильной» согласно классификации по индексу  $D_{st}$  (Loewe, Prölss, 1997). По классификации НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, *англ*. NASA — National Aeronautics and Space Administration) (https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation) буря относилась к классу G2 («средняя»). В максимуме бури  $D_{st}$ -индекс понизился до -104 нТл в 23:00 UT 13 октября 2016 г.;  $K_p$ -индекс возрастал от 0 до 6—;  $A_p$ -индекс достиг 94 (http://wdc. kugi.kyoto-u.ac.jp).



*Рис. 2.* Временные вариации индексов геомагнитной активности  $D_{st}$ ,  $K_p$  и  $A_p$  в период бури 12–20 октября 2016 г. F10.7 — индекс интегральной солнечной активности



*Рис. 3.* Долготно-временные вариации дисперсий *H*- и *Z*-компонент ГМП для бури 12–20 октября 2016 г. (время UT) и распределения дисперсий ГМП в полярных координатах для отдельных дней октября 2016 г. для спокойных (левый столбец) и возмущённых (правый столбец) условий на широтах:  $a - \sim 55^{\circ}$  с. ш.;  $\delta - \sim 70^{\circ}$  с. ш.

В работах (Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018;) впервые была выявлена долготная неоднородность ионосферы над регионом Евразии, основная причина которой заключалась в конфигурации ГМП. Предполагалось, что нерегулярная структура долготной изменчивости компонент ГМП — следствие пространственных аномалий различных масштабов в фоновом магнитном поле Земли, а также несовпадения магнитного и географического полюсов.

На основе данных двух цепей магнитометров сети INTERMAGNET в средних и высоких широтах (см. *рис. 16*) получены долготные распределения дисперсий *H*- и *Z*-компонент ГМП для рассматриваемой магнитной бури в спокойных и возмущённых условиях (*рис. 3*).

В долготном распределении вариаций ГМП, как и в наших предыдущих исследованиях, выделены явно выраженные долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы. Максимальные неоднородности долготных вариаций дисперсий ГМП наблюдаются в большинстве случаев на средних широтах (вблизи ~55° с.ш.) (см. *рис. 3a*). Следует отметить, что для периода магнитной бури 12–20 октября 2016 г. максимальные вариации компонент ГМП отмечались в западном полушарии в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи ~270° (~90° з.д. в географических координатах) и на долготах ~225° (~135° з.д.) и ~315° (~45° з.д.). В восточном полушарии в магнито-возмущённый период над Евразией наиболее выраженно проявилась зона сильных вариаций ГМП на долготах ~100–130° в.д. На высоких широтах (вблизи ~70° с.ш.) изменчивость ГМП более равномерна по долготе (см. *рис. 3б*), но долготные неоднородности вариаций ГМП также проявляются.

Зоны максимальных вариаций ГМП соответствуют зонам усиленного проникновения геомагнитных возмущений из высоких широт в средние. Им соответствуют области сильных отрицательных возмущений ионосферы, т.е. понижения f<sub>o</sub>F2, что связано с уменьшением электронной концентрации в максимуме F2 слоя ионосферы. В секторе долгот 80-110° в.д. (зона расположения Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии), симметричном находящемуся в западном полушарии геомагнитному полюсу, уровень вариаций ГМП всегда низкий. В связи с этим над регионом Евразии на долготах ~80–110° ионосфера имеет устойчивую положительную аномалию и раньше всего восстанавливается после геомагнитных возмущений. В работе (Moro et al., 2019) по результатам исследования вариаций параметров ионосферы по данным двух низкоширотных ионозондов, расположенных примерно на одинаковых широтах в северном и южном полушариях, установлено, что во время геомагнитных бурь изменчивость ионосферных параметров выше для ионозонда в Санта-Мария (Бразилия), находящегося в регионе Южно-Американской магнитной аномалии, чем для ионозонда Ухань (Китай). Авторы связывают эту особенность ионосферных эффектов на геомагнитные возмущения именно наличием региональных особенностей основного ГМП в регионе Южной Америки.



*Рис. 4.* Долготно-временные вариации  $f_oF2$  по данным среднеширотной цепи ионозондов (*a*) и вертикального ПЭС по данным среднеширотной цепи приёмников GPS/ГЛОНАСС (*б*) в период бури 12–20 октября 2016 г. (время UT). Вертикальные пунктирные линии отмечают внезапное начало бури (SSC). Нижняя панель — вариации индекса геомагнитной активности  $D_{cr}$ 

Рисунок 4 демонстрирует долготно-временные вариации ионизации ионосферы по данным цепи среднеширотных ионозондов и приёмников GPS/ГЛОНАСС. Суточные вариации  $f_oF2$  и вертикального ПЭС слева от пунктирной линии (внезапное начало бури, *англ.* storm sudden commencements — SSC) дают представление о вариациях этих параметров в невозмущённых геомагнитных условиях. Серым цветом на *рис. 4а* показаны периоды отсутствия данных ионозондов. В период равноденствия наблюдается ярко выраженный переход «день – ночь» в вариациях  $f_oF2$ . Наклон суточных максимумов и минимумов параметров ионизации соответствует разнице в локальном времени для приёмных станций.

Непосредственно после SSC наблюдалось сильное увеличение электронной концентрации в *F*-области ионосферы по данным ионозондов Иркутск, Новосибирск, Москва, Пругонице, Юлиусру (f<sub>0</sub>F2 увеличилась на 2-4 МГц) (см. puc. 4a), а также по данным ПЭС (см. рис. 4б). Для сибирских ионозондов Иркутск и Новосибирск это было проявление так называемого сумеречного эффекта (англ. dusk enhancement) — резкого увеличения ионизации F-области в вечерней ионосфере за счёт совместной перестройки картины магнитосферной конвекции и высыпаний энергичных электронов на главной фазе магнитной бури (Тащилин, Романова, 2011; Buonsanto, 1995). Подобный эффект также наблюдался в период мартовской бури 2015 г. (Черниговская и др., 2019, 2020; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018). Для европейских ионозондов Москва, Пругонице и Юлиусру такое резкое увеличение ионизации в дневное время 13 октября 2016 г. на главной фазе магнитной бури можно отнести к положительной фазе ионосферной бури. Долготный эффект в ионосфере во время магнитной бури в октябре 2016 г. исследовался в работе (Wan et al., 2018) по данным цепи из 23 приёмников GPS вдоль примерно 40° с. ш. и двух европейских ионозондов Эбро и Чилтон. Как данные ионозондов, так и данные ПЭС показали всплеск ионизации над регионом западной Европы 13 октября 2016 г.

Затем произошло резкое уменьшение критических частот на 5–7 МГц относительно значений в спокойные дни практически для всех ионозондов евразийской цепи (кроме ионозондов Пругонице и Юлиусру). Отрицательная фаза бури и сопровождающее её усиление поглощения радиоволн оказали негативное влияние на ионосферный канал, приведя к его деградации вплоть до полного блэкаута на ионозондах Якутск (с 15:00 UT 13 октября до 20:00 UT 14 октября) и Иркутск (с 17:00 UT 13 октября, затем с 14 до 17 октября ионозонд не работал по техническим причинам). ГИП переместился на средние широты. В последующие дни наибольшее падение ионизации отмечалось в зоне сильных вариаций ГМП на долготах ~130° в.д. (по данным ионозонда Якутск) и ~40–60° в.д. (по данным ионозондов Москва, Екатеринбург). По данным ионозондов Пругонице и Юлиусру, над регионом Центральной Европы отрицательная фаза ионосферной бури была выражена несущественно, но, как подчёркивалось выше, наблюдалась сильная положительная фаза бури 13 октября 2016 г. в течение нескольких часов в период главной фазы геомагнитной бури.

В регионе ~ $80-110^{\circ}$  в.д. (ионозонды Новосибирск, Иркутск) ионосфера начала восстанавливаться до значений ионизации в невозмущённых условиях раньше других долготных регионов Евразии начиная с 17 октября 2016 г. Этот долготный сектор характеризуется низким уровнем вариаций ГМП над регионом Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии (см. *рис. 3*) (Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018).

Долготно-временные вариации ионосферных параметров в периоды сильных геомагнитных бурь в марте 2015 г. (Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018) и октябре 2016 г. (см. *рис. 4*) в условиях равноденствия при идентичной фоновой (невозмущённой) ионосфере с выраженным переходом от дневных условий к ночным имели очень схожую качественную картину с аналогичным ярким проявлением особенностей, связанных с зависимостью от изменчивости вариаций ГМП. Отличия составляли абсолютные величины параметров ионизации *F*2-области, которые для экстремальной бури марта 2015 г. были выше.

Для отклика ионосферы на магнитную бурю в октябре 2016 г., также как и для бури в марте 2015 г., наблюдается переход от положительной к отрицательной фазе ионосферной бури. Переход от одного типа эффектов магнитных бурь к другому более характерен для зимы, чем для лета (Burešová et al., 2007). Возникновение такого поведения возрастает также с уменьшением широты. Для бурь в условиях равноденствия эта связь чётко не определена. Однако месяцы март и октябрь в анализируемом среднеширотном диапазоне, скорее всего, относятся к зимней половине года; возможно, поэтому мы наблюдаем обе фазы магнитной бури для событий октября 2016 г. (см. *рис. 4*) и марта 2015 г. (Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018).

На *рис. 5а* приведены вариации высот максимума слоя F2 для исследуемого события. В данном случае мы рассматриваем не сами значения  $h_mF2$ , а их отклонения от фонового уровня  $\Delta h_mF2$ , чтобы исключить неоднозначность определения этого параметра на ионозондах разного типа. Фоновые величины вычислялись усреднением значений h<sub>m</sub>F2(t) скользящим средним на интервале сглаживания (t - 14, t + 14) дней до и после каждого часа t текущего дня. Во время главной фазы бури 13 октября 2016 г. (см. *рис. 2*) высота максимума h<sub>m</sub>F2 резко поднялась по данным всех ионозондов цепи. Для сибирских ионозондов Иркутск, Новосибирск наблюдаемое повышение высоты максимума ионизации на 40-60 км связано с проявлением сумеречного эффекта (Тащилин, Романова, 2011; Buonsanto, 1995). Для ионозондов Москва, Пругонице и Юлиусру  $\Delta h_m F2$  составило ~60-100 км и свидетельствовало о развитии положительной фазы ионосферной бури над территорией Европы. Этот эффект подъёма максимума h<sub>m</sub>F2 в период магнитной бури связан с постоянным оттоком плазмы вверх в плазмосферу, в данном конкретном случае — в течение примерно суток. Повторный подъём высоты максимума h<sub>m</sub>F2 по данным европейских ионозондов зарегистрирован в конце суток 16 и 17 октября. Возможно, это следствие всплеска геомагнитной активности в вариациях A<sub>p</sub>- и K<sub>p</sub>-индексов (см. puc. 2), связанного с высокоскоростным потоком из корональной дыры (CH HSS), зарегистрированного 16 октября 2016 г. С 18 октября абсолютное отклонение ∆*h*<sub>*m</sub></sub><i>F*2 понизилось до значений −40...−60 км, ионосфера начала восстанавливать-</sub> ся до значений ионизации в невозмущённых условиях первоначально в регионе ~80-110° в.д. (ионозонды Новосибирск, Иркутск).



*Рис. 5.* Долготно-временные вариации  $\Delta h_m F2$  (*a*) и  $f_o E_s$  (*б*) по данным среднеширотной цепи ионозондов в период бури 12–20 октября 2016 г. (время UT)

Характерной особенностью протекания геомагнитных возмущений также выступает высокая вероятность образования спорадических слоёв Е. Рисунок 56 показывает, что наблюдались периоды появления слоя Е в ионосфере над Европой во время положительной фазы ионосферной бури 13 октября 2016 г., а также над регионами Якутска и Екатеринбурга в конце суток 14 октября. Отчётливо прослеживается отсутствие Е, в ионосфере над Иркутском, т.е. в долготном секторе, где уровень вариаций ГМП низкий (см. рис. 3). Это, напомним, регион Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии. В работе (Arras et al., 2008), в которой представлено обширное исследование частоты появления спорадического Е-слоя по данным большой базы GPS-радиозатменных измерений, сделан вывод, что в глобальном распределении частоты появления  $E_s$ -слоя очень ярко отмечаются депрессивные области над Южной Атлантикой и Северной Америкой. В этих регионах частота появления Е. значительно ниже, чем где-либо ещё в полосе средних широт. Авторы связали это с расположением в этих двух среднеширотных регионах земного шара континентальных магнитных аномалий, где напряжённость горизонтальной компоненты магнитного поля Н сильно уменьшена. По аналогии с выводами работы (Arras et al., 2008) можно заключить, что над регионом Восточно-Сибирской континентальной магнитной аномалии могут также складываться подобные условия для формирования спорадических слоёв Е в ионосфере.

### Выводы

Выполнено комплексное исследование вариаций параметров ионосферы в средних и высоких широтах северного полушария по данным ионозондов, приёмников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров глобальной сети INTERMAGNET во время сильной геомагнитной бури в октябре 2016 г. Проведённое исследование подтверждает сделанный ранее в работах (Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018) вывод, что структура магнитосферно-ионосферной токовой системы во время магнитных бурь зависит от пространственных аномалий основного геомагнитного поля, проявляющихся в вариациях параметров ГМП и ионосферы.

На главной фазе магнитной бури в октябре 2016 г., также как и бури в марте 2015 г., наблюдался переход от положительного к отрицательному эффекту ионосферной бури.

На фазе восстановления бури наибольшее падение ионизации отмечалось в зоне сильных вариаций ГМП на долготах ~130° в.д. (по данным ионозонда Якутск) и ~40–60° в.д. (по данным ионозондов Москва, Екатеринбург).

Над регионом Евразии на долготах ~80–110° в.д. (по данным ионозондов Новосибирск, Иркутск) ионосфера раньше других долготных зон начала восстанавливаться после геомагнитного возмущения ввиду низкого уровня вариаций ГМП на этих долготах.

Долготно-временные вариации ионосферных параметров в периоды сильных геомагнитных бурь в октябре 2016 г. и марте 2015 г. (Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2015, 2018) в условиях равноденствия при идентичной фоновой (невозмущённой) ионосфере с выраженным переходом от дневных условий к ночным имели очень схожую картину с аналогичным ярким проявлением особенностей, связанных с зависимостью от изменчивости вариаций ГМП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Экспериментальные данные получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (Институт солнечно-земной физики СО РАН) (http://ckp-rf.ru/ckp/3056).

### Литература

- 1. Поляков В. М., Щепкин Л. А., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.
- 2. *Тащилин А. В., Романова Е. Б.* Роль магнитосферной конвекции и высыпаний в образовании «сумеречного эффекта» на главной фазе магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 4. С. 474–480.
- 3. Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Хабитуев Д.С., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коуба Д., Мелич Й. 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.
- 4. *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.
- Arras C., Wickert J., Beyerle G., Heise S., Schmidt T., Jacobi C. A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35(14). Art. No. L14809. 4 p. DOI: 10.1029/2008GL034158.
- 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.
- Blanc M., Richmond A. D. The ionospheric disturbance dynamo // J. Geophysical Research. 1980. V. 85. P. 1669–1686.
- 8. *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.
- 9. Buonsanto M. J. Ionospheric storms a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.

- 10. *Burešová D., Laštovička J., De Franceschi G.* Manifestation of Strong Geomagnetic Storms in the Ionosphere above Europe // Space Weather: Research Towards Applications in Europe / ed. Lilensten J. Dordrecht: Springer, 2007. P. 185–202.
- Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Yasyukevich A. S., Khabituev D. S., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Kouba D., Mielich J. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations // Advances in Space Research. 2021. V. 67. No. 2. P. 762–776. DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.028.
- 12. Dmitriev A. V., Huang C.-M., Brahmanandam P.S., Chang L. C., Chen K.-T., Tsai L.-C. Longitudinal variations of positive dayside ionospheric storms related to recurrent geomagnetic storms // J. Geophysical Research: Space Physics. 2013. V. 118. P. 6806–6822. DOI: 10.1002/jgra.50575.
- 13. *Dudok de Wit T., Watermann J.* Solar forcing of the terrestrial atmosphere // Comptes Rendus Geoscience. 2009. V. 342. No. 4–5. P. 259–272. DOI: 10.1016/j.crte.2009.06.001.
- 14. *Hafstad L. R., Tuve M.A.* Note on Kennelly-Heaviside Layer Observations during a Magnetic Storm // Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1929. V. 34. No. 1. P. 39–43.
- 15. *Huang C. M.* Disturbance dynamo electric fields in response to geomagnetic storms occurring at different universal times // J. Geophysical Research: Space Physics. 2013. V. 118. P. 496–501. DOI: 10.1029/2012JA018118.
- Kuai J., Liu L., Lei J., Liu J., Zhao B., Chen Y., Le H., Wang Y., Hu L. Regional differences of the ionospheric response to the July 2012 geomagnetic storm // J. Geophysical Research: Space Physics. 2017. V. 122. P. 4654–4668. DOI: 10.1002/2016JA023844.
- 17. 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.
- 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.
- Li Q., Liu L., Balan N., Huang H., Zhang R., Chen Y., Le H. Longitudinal structure of the midlatitude ionosphere using COSMIC electron density profiles // J. Geophysical Research: Space Physics. 2018. V. 123. P. 8766–8777. DOI: 10.1029/2017JA024927.
- 20. Loewe C.A., Prölss G. W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. No. A7. P. 14209–14213.
- 21. *Mansilla G.A.* Mid-latitude ionospheric effects of a great geomagnetic storm // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2004. V. 66. P. 1085–1091. DOI: 10.1016/j.jastp.2004.04.003.
- 22. *Mansilla G.A., Zossi M. M.* Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. 177. P. 5833–5844. DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1.
- 23. *Matsushita S*. A study of the morphology of ionospheric storms // J. Geophysical Research. 1959. V. 64. No. 3. P. 305–321. DOI: 10.1029/JZ064i003p00305.
- 24. *Mendillo M*. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // Reviews Geophysics. 2006. V. 44. Art. No. RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193.
- 25. *Moro J., Xu J., Denardini C. M., Resende L. C. A., Silva R. P., Liu Z., Li H., Yan C., Wang C., Schuch N.J.* On the sources of the ionospheric variability in the South American Magnetic Anomaly during solar minimum // J. Geophysical Research: Space Physics. 2019. V. 124. P. 7638–7653. DOI: 10.1029/2019JA026780.
- 26. *Prölss G. W.* Ionospheric F-region storms // Handbook of atmospheric electrodynamics / ed. Volland H. Boca Raton: CRC Press, 1995. V. 2. Ch. 8. P. 195–248.
- 27. Prölss G. W., Brace L. H., Mayr H. G., Carignan G. R., Killeen T. L. Klobuchar J. A. Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: A case study // J. Geophysical Research. 1991. V. 96. P. 1275–1288.
- 28. *Rishbeth H.* How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1998. V. 60. P. 1385–1402.
- 29. Shpynev B. G., Kurkin V. I., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Grigorieva S. A., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Pancheva D., Mukhtarov P. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. Art. No. 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
- 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 highmiddle latitudes ionosonde chain // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 93–105. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
- Wan Q., Li J., Wang X., Fan J., Zhang J., Ma G. A Study of TEC Storm on 13 October 2016 // China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proc. / eds. Sun J., Yang C., Guo S. 23–25 May, 2018. Harbin International Exhibition Center, China. 2018. V. 1. P. 97–104. DOI: 10.1007/978-981-13-0005-9\_8.
- 32. *Wang H., Zhang K.* Longitudinal structure in electron density at mid-latitudes: upward-propagating tidal effects // Earth, Planets and Space. 2017. V. 69. Art. No. 11. DOI: 10.1186/s40623-016-0596-9.

## Longitudinal variations in the response of the mid-latitude ionosphere of the Northern Hemisphere to the October 2016 geomagnetic storm using multi-instrumental observations

M. A. Chernigovskaya<sup>1</sup>, B. G. Shpynev<sup>1</sup>, A. S. Yasyukevich<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 Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS Paratunka 684034, Russia

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

<sup>6</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetizm 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 of Atmospheric Physics, Kühlungsborn 18225, Germany

A multi-instrumental study of variations in ionospheric and geomagnetic parameters in the Northern Hemisphere during a strong magnetic storm in October 2016 was carried out based on the analysis of data from the Eurasian mid-latitude ionosonde chain, mid-and high-latitude chains of GPS/GLONASS receivers and magnetometers of the global INTERMAGNET network. The manifestations of the longitude inhomogeneity of ionospheric effects associated with the irregular structure of the longitudinal variability of the components of the geomagnetic field have been confirmed. A comparison was made of the scenarios for the development of ionospheric disturbances under equinox conditions during a strong magnetic storms in October 2016 and in March 2015. At the main phase of the magnetic storm in October 2016, as well as the storm in March 2015, a transition from a positive to a negative effect of the ionospheric storm was observed. In the recovery phase of the storm in October 2016 the largest decrease in ionization was observed in the zone of strong variations in geomagnetic field components at longitudes  $\sim 130^{\circ}$  E (according to the data of the Yakutsk ionosonde) and  $\sim 40-60^{\circ}$  E (according to ionosondes data Moscow, Ekaterinburg). Over the region of Eurasia at longitudes  $\sim 80-110^{\circ}$  E (according to data from ionosondes Novosibirsk, Irkutsk), the ionosphere began to recover earlier than other longitudinal zones after geomagnetic disturbances due to the low level of variations in the components of the geomagnetic field at these longitudes.

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

> Accepted: 21.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-305-317

#### References

- Polyakov V. M., Shchepkin L. A., Kazimirovsky E. S., Kokourov V. D., Ionosfernye protsessy (Ionospheric 1. processes), Novosibirsk: Nauka, 1968, 535 p. (in Russian).
- Tashchilin A.V., Romanova E.B., Role of magnetospheric convection and precipitation in the formation 2. of the "Dusk Effect" during main phase of a magnetic storm, Geomagnetism and Aeronomy, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 468–474.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Khabituev D.S., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., 3. Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Kouba D., Melich I., Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters during severe magnetic storms in 2015, Sovremennye problemy

*distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 336–347 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-336-347.

- 4. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., Khabituev D.S., Ionospheric longitudinal variability in the Northern Hemisphere during magnetic storm from ionosonde and GPS/GLONASS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 269–281 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-269-281.
- 5. Arras C., Wickert J., Beyerle G., Heise S., Schmidt T., Jacobi C., A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation, *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(14), Art. No. L14809, 4 p., DOI: 10.1029/2008GL034158.
- 6. 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.
- 7. Blanc M., Richmond A. D., The ionospheric disturbance dynamo, *J. Geophysical Research*, 1980, Vol. 85, pp. 1669–1686.
- 8. 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.
- 9. Buonsanto M. J., Ionospheric storms a review, Space Science Reviews, 1999, Vol. 88, pp. 563–601.
- 10. Burešová D., Laštovička J., De Franceschi G., Manifestation of Strong Geomagnetic Storms in the Ionosphere above Europe, In: *Space Weather: Research Towards Applications in Europe*, Lilensten J. (ed.), Dordrecht: Springer, 2007, pp. 185–202.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., Khabituev D.S., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A. E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Kouba D., Mielich J., Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations, *Advances in Space Research*, 2021, Vol. 67, No. 2, pp. 762–776, DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.028.
- 12. Dmitriev A. V., Huang C.-M., Brahmanandam P. S., Chang L. C., Chen K.-T., Tsai L.-C., Longitudinal variations of positive dayside ionospheric storms related to recurrent geomagnetic storms, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 6806–6822, DOI: 10.1002/jgra.50575.
- 13. Dudok de Wit T., Watermann J., Solar forcing of the terrestrial atmosphere, *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, Vol. 342, No. 4–5, pp. 259–272, DOI: 10.1016/j.crte.2009.06.001.
- 14. Hafstad L.R., Tuve M.A., Note on Kennelly-Heaviside Layer Observations during a Magnetic Storm, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1929, Vol. 34, No. 1, pp. 39–43.
- 15. Huang C. M., Disturbance dynamo electric fields in response to geomagnetic storms occurring at different universal times, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 496–501, DOI: 10.1029/2012JA018118.
- Kuai J., Liu L., Lei J., Liu J., Zhao B., Chen Y., Le H., Wang Y., Hu L., Regional differences of the ionospheric response to the July 2012 geomagnetic storm, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2017, Vol. 122, pp. 4654–4668, DOI: 10.1002/2016JA023844.
- 17. 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.
- 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.
- Li Q., Liu L., Balan N., Huang H., Zhang R., Chen Y., Le H., Longitudinal structure of the midlatitude ionosphere using COSMIC electron density profiles, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2018, Vol. 123, pp. 8766–8777, DOI: 10.1029/2017JA024927.
- 20. Loewe C. A., Prölss G. W., Classification and mean behavior of magnetic storms, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, No. A7, pp. 14209–14213.
- 21. Mansilla G.A., Mid-latitude ionospheric effects of a great geomagnetic storm, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, Vol. 66, pp. 1085–1091, DOI: 10.1016/j.jastp.2004.04.003.
- 22. Mansilla G.A., Zossi M.M., Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes, *Pure and Applied Geophysics*, 2020, Vol. 177, pp. 5833–5844, DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1.
- 23. Matsushita S., A study of the morphology of ionospheric storms, *J. Geophysical Research*, 1959, Vol. 64, No. 3, pp. 305–321, DOI: 10.1029/JZ064i003p00305.
- 24. Mendillo M., Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content, *Reviews Geophysics*, 2006, Vol. 44, Art. No. RG4001, DOI: 10.1029/2005RG000193.
- 25. Moro J., Xu J., Denardini C. M., Resende L. C. A., Silva R. P., Liu Z., Li H., Yan C., Wang C., Schuch N. J., On the sources of the ionospheric variability in the South American Magnetic Anomaly during solar minimum, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2019, Vol. 124, pp. 7638–7653, DOI: 10.1029/2019JA026780.

- 26. Prölss G. W., Ionospheric F-region storms, In: *Handbook of atmospheric electrodynamics*, Volland H. (ed.), Boca Raton: CRC Press, 1995, Vol. 2, Ch. 8, pp. 195–248.
- 27. Prölss G.W., Brace L.H., Mayr H.G., Carignan G.R., Killeen T.L., Klobuchar J.A., Ionospheric storm effects at subauroral latitudes: A case study, *J. Geophysical Research*, 1991, Vol. 96, pp. 1275–1288.
- 28. Rishbeth H., How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, Vol. 60, pp. 1385–1402.
- Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A. E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P., High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming, *Earth*, *Planets and Space*, 2015, Vol. 67, Art. No. 18, DOI: 10.1186/ s40623-015-0187-1.
- 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 highmiddle latitudes ionosonde chain, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 93–105, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014.
- Wan Q., Li J., Wang X., Fan J., Zhang J., Ma G., A Study of TEC Storm on 13 October 2016, In: *China Satellite Navigation Conf. (CSNC) 2018 Proc.*, Sun J., Yang C., Guo S. (eds.), 23–25 May, 2018, Harbin International Exhibition Center, China, 2018, Vol. 1, pp. 97–104, DOI: 10.1007/978-981-13-0005-9\_8.
- 32. Wang H., Zhang K., Longitudinal structure in electron density at mid-latitudes: upward-propagating tidal effects, *Earth, Planets and Space*, 2017, Vol. 69, Art. No. 11, DOI: 10.1186/s40623-016-0596-9.