

Отклик системы «ионосфера – термосфера» над регионом средних широт Евразии на геомагнитные бури в марте 2012 года

М. А. Черниговская, Б. Г. Шпынев, Д. С. Хабитуев

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия
E-mail: cher@iszf.irk.ru

Выполнено исследование вариаций ионосферных и атмосферных параметров в Северном полушарии в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. на основе анализа данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов и спутниковых измерений GUVI (*англ.* Global Ultraviolet Imager) TIMED (*англ.* Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) атмосферных составляющих на высотах термосферы (ионосферы) выше ~100 км. Показана долготная неоднородность ионизации ионосферы над регионом средних широт Евразии на высотах максимума F_2 -слоя ионосферы. Выполнен анализ пространственно-временных вариаций отношения плотности $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа выше ~100 км по данным спутниковых измерений GUVI TIMED для Северного полушария в целом и дополнительно для средних широт Восточного полушария. Подчёркнута сложная физика длительного магнито-возмущённого периода в марте 2012 г. с переключением между положительной и отрицательной фазой ионосферной бури в один и тот же период магнитной бури для различных пространственных областей. Обсуждены возможные механизмы смены эффектов ионосферной бури в условиях события серии магнитных бурь в марте 2012 г.

Ключевые слова: цепь ионозондов, ионосферные возмущения, геомагнитная буря, вариации газового состава термосферы

Одобрена к печати: 14.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-303-315

Введение

Цель статьи заключается в экспериментальном исследовании пространственно-временных вариаций параметров в системе «ионосфера – атмосфера» (ИТ), связанных с возмущениями в магнитосфере Земли, которые определяются в первую очередь проявлениями солнечной активности (Dudok de Wit, Watermann, 2009). Вследствие сложных процессов взаимодействия высокоэнергетического солнечного ветра с геомагнитным полем происходят возмущения его напряжённости — геомагнитные бури, выступающие ярким проявлением гелио-геомагнитной активности. В периоды магнитных бурь в ионосфере развивается целый комплекс сложных процессов (так называемые ионосферные бури), в результате которых существенно изменяются её параметры (Buonsanto, 1999; Fuller-Rowell et al., 1994; Prölss, 1995; Schunk, Sojka, 1996).

Ионосферные бури сопровождаются значительными вариациями критической частоты (f_oF_2) F_2 -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). Развитие отрицательных и положительных эффектов ионосферных бурь сильно зависит от местного времени, сезона, географического региона (Buonsanto, 1999; Prölss, 1995; Rishbeth, 1998).

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). М. Дж. Ситон (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. Кислород, как более лёгкий газ, подвержен более сильному переносу по сравнению с азотом. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению отношения $[O]/[N_2]$ на высотах верхней атмосферы и, как следствие, к отрицательным возмущениям электронной концентрации в F -области ионосферы (Danilov, 2003; Klimenko et al., 2011; Laštovička, 2002; Liou et al., 2005; Mayr, Volland, 1972; Prölss, Werner, 2002).

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 становятся процессы в приэкваториальных широтах в периоды геомагнитных бурь. Электродинамический дрейф ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) в области экватора, усиленный электрическими полями быстрого проникновения (*англ.* Prompt Penetration Electric Fields — PPEFs), приводит к подъёму ионосферной плазмы до высот 800–1000 км (Astafyeva, 2009). Перенос плазмы из приэкваториальной области на большие высоты и в более высокие широты образует гигантский плазменный фонтан (дневной ионосферный супер-фонтан) (Tsurutani et al., 2004). Согласно А. Д. Данилову (Danilov, 2013), электрические поля быстрого проникновения, PPEFs, ответственны за положительные фазы ионосферных бурь, наблюдаемые в низких и средне-низких широтах даже во время умеренных бурь, маскируя эффекты отрицательных ионосферных бурь. Фотоионизация нижней F -области ионосферы производит «новую» плазму, которая возмещает поднятую вверх под действием ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$)-дрейфа, тем самым приводя к увеличению полного электронного содержания (ПЭС). Это является доминирующим эффектом положительных ионосферных бурь в средних широтах.

Таким образом, процессы в нейтральной атмосфере — неотъемлемая часть сложной последовательности электро-/динамических и химических процессов, развивающихся в системе ИТ в периоды гелио-геомагнитной активности. Для изучения взаимосвязей этих процессов часто используются спутниковые данные о вариациях состава атмосферы на высотах термосферы. В частности, с помощью ультрафиолетового (УФ) спектрометра GUVI (*англ.* Global Ultraviolet Imager) TIMED (*англ.* Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) (Christensen et al., 2003) измеряется отношение плотности $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа выше 100 км. Этот физический параметр входит в число ключевых, определяющих состояние системы ИТ во время ионосферных бурь. Он отражает циркуляцию атомарного кислорода на высотах термосферы и становится хорошим индикатором отрицательных фаз ионосферных бурь.

Выполненные в последние годы исследования ионосферного отклика на экстремальные магнитные бури в марте и июне 2015 г. по данным восьми среднеширотных евразийских ионозондов (Черниговская и др., 2019; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2018) привели авторов к заключению, что 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 $[O]/[N_2]$ 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 счёт 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 исследования данного физического механизма в течение длительного периода повышенной геомагнитной активности в марте 2012 г.

Данные экспериментальных измерений

В настоящей работе для анализа отклика ионосферы на геомагнитную бурю используются: 1) данные о среднечасовых значениях критической частоты f_oF2 ионосферы по измерениям цепи из семи среднеширотных евразийских ионозондов, расположенных в диапазоне широт $50\text{--}60^\circ$ с.ш. с интервалом $15\text{--}20^\circ$ по долготе в долготном секторе $13\text{--}158^\circ$ в.д.; 2) спутниковые измерения отношения плотности $[O]/[N_2]$ в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~ 100 км, проводимые оптическим методом с помощью УФ-спектрометра (<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>).

Евразийскую цепь (белые кружки на *рис. 1*) составляли ионозонд АИС (автоматическая ионосферная станция) в Паратунке, два российских ионозонда «Парус» различных модификаций (в Новосибирске и Екатеринбурге) и четыре цифровых ионозонда DPS-4 (*англ.* Digisonde Portable Sounder 4) различных модификаций (в Якутске, Иркутске, Москве, Юлиусру (*нем.* Juliusruh)). Временное разрешение для различных ионозондов варьируется от 15 мин до 1 ч (для ионозондов «Парус»). В работах (Черниговская и др., 2019; Chernigovskaya et al., 2021; Shpynev et al., 2018) приведено подробное описание расположения ионозондов, а также рядов исходных экспериментальных данных и методики их обработки.

Для анализа в настоящей работе мы использовали значения абсолютного отклонения df_oF2 критической частоты слоя $F2$ ионосферы от фонового уровня. Фоновые величины вычислялись путём усреднения значений $f_oF2(t)$ 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 $f_oF2(t)$ рассчитывались ряды отклонения $df_oF2(t)$ от фонового уровня.

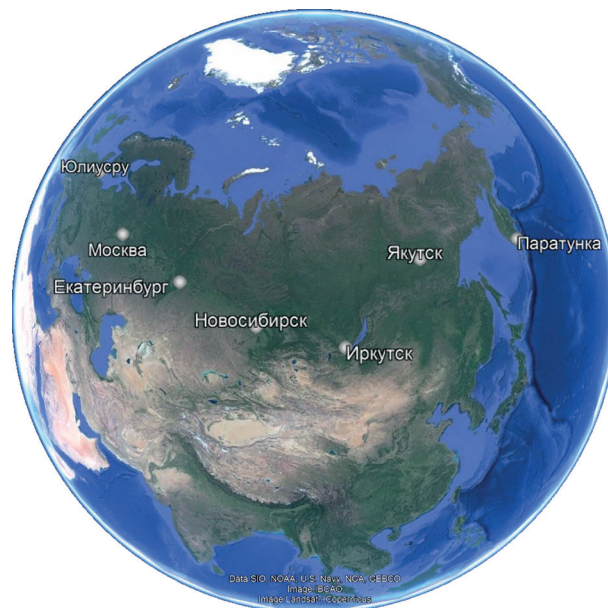


Рис. 1. Схема расположения цепи среднеширотных евразийских ионозондов

Анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов

Анализируемый период повышенной геомагнитной активности состоял из четырёх магнитных бурь: 7, 9, 12 и 15 марта 2012 г. (события S1–S4 соответственно на *рис. 2*, см. с. 306). Солнечная активность была на высоком уровне в течение 5–7, 9–10 и 13–14 марта, в основном из-за серии продолжительных крупных солнечных вспышек из активной области 1429: X1.1 — 5 марта, X5.4 — 7 марта, M6.3 — 9 марта, M8.4 — 10 марта, M7.9 — 13 марта, M2.8 — 14 марта (Tsurutani et al., 2014). Все вспышки были связаны с корональными выбросами массы (*англ.* Coronal Mass Ejections — CMEs), направленными на Землю. В период исследуемого временного интервала произошло событие высокоскоростного потока (*англ.* Coronal Hole High Speed Streams — CH HSS) из одной корональной дыры, которое длилось с 16 по 18 марта после события магнитной бури S4.

Магнитная буря началась 7 марта (S1) после прихода CME, связанного со вспышкой X1.1 5 марта. В максимуме бури D_{st} -индекс понизился до -85 нТл в 15:00 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время) 7 марта 2012 г.; K_p -индекс возрастал до 6₀; A_p -индекс достиг 80 нТл (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) (см. *рис. 2*). Магнитная буря 7–8 марта 2012 г. была умеренной согласно

классификации по индексу D_{st} (Loewe, Prölss, 1997), по классификации NASA (англ. NASA — National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США — НАСА) (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>) буря относилась к классу G2 (умеренная). Самой интенсивной из анализируемых была магнитная буря 9–11 марта 2012 г. (S2). Она связана со вспышкой X5.4 7 марта (самой мощной за исследуемый интервал) и сопутствующим CME, который достиг Земли спустя примерно два дня. В максимуме бури D_{st} -индекс понизился до -143 нТл в 08:00 UT 9 марта 2012 г.; K_p -индекс возрастал до 8₀; A_p -индекс достиг 207 нТл (см. рис. 2). Третья магнитная буря началась 12 марта (S3) как следствие солнечных вспышек 9 марта M6.3, M8.4 — 10 марта и сопутствующих CMEs. В максимуме бури D_{st} -индекс понизился до -51 нТл в 16:00 UT 12 марта 2012 г.; K_p -индекс возрастал до 6₊; A_p -индекс достиг 94 нТл (см. рис. 2). Магнитная буря 12–14 марта 2012 г. была умеренной (класс G2). Четвёртая магнитная буря началась 15 марта (S4) после прихода CMEs, связанных со вспышками M7.9 13 марта, M2.8 — 14 марта. В максимуме бури D_{st} -индекс понизился до -80 нТл в 19:00 UT 15 марта 2012 г.; K_p -индекс возрастал до 6₊; A_p -индекс достиг 94 нТл (см. рис. 2). Буря сопровождалась событием CH HSS, которое длилось с 16 по 18 марта после главной фазы магнитной бури S4, что привело к продлению фазы восстановления бури. Магнитная буря 15–19 марта 2012 г. была умеренной (класс G2).

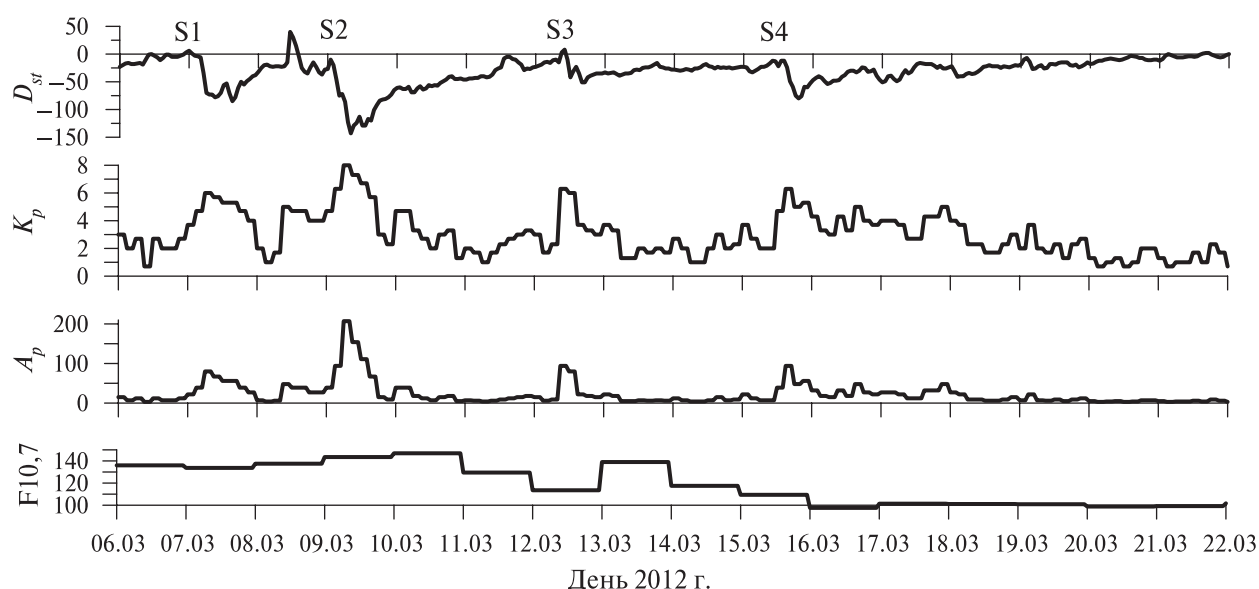


Рис. 2. Временные вариации индексов гелио-геомагнитной активности D_{st} , K_p , A_p , $F_{10.7}$ в период бурь в марте 2012 г.

Индекс солнечной активности $F_{10.7}$ в течение анализируемого временного периода изменялся от 147 до 100 (в единицах 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹) (см. рис. 2, нижняя панель).

Для проверки выдвинутой гипотезы о формировании в термосфере глобальной волны атмосферного газа, которая, образовавшись в полярных областях термосферы в периоды геомагнитных возмущений, затем распространяется в область средних широт Северного полушария и перемещается в западном направлении в течение нескольких суток в период восстановительной фазы бури, нами были проанализированы данные спутниковых измерений отношения плотности $[O]/[N_2]$ в столбе атмосферного газа на высотах термосферы (ионосферы) выше ~100 км с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED (Christensen et al., 2003). Как уже подчёркивалось, этот физический параметр входит в число ключевых, определяющих состояние системы ИТ во время ионосферных бурь. На рис. 3 (см. с. 307) представлены данные спутниковых измерений отношения $[O]/[N_2]$ для каждого отдельного дня анализируемого периода повышенной геомагнитной активности в марте 2012 г. Эти распределения подтверди-

ли образование обширной области пониженного отношения $[O]/[N_2]$ над регионом Дальнего Востока 8 марта 2012 г. на фазе восстановления умеренной магнитной бури (S1), начавшейся 7 марта. В последующий день эта область переместилась на запад по направлению к европейскому региону. Другая, более обширная область пониженного отношения $[O]/[N_2]$, которая образовалась 7 марта в Западной полушарии над средними широтами американского континента, переместилась к 9 марта 2012 г. к региону акватории Тихого океана, а к 10 марта достигла долгот 140–160° в.д. и вновь была зарегистрирована над регионом Дальнего Востока. Следует подчеркнуть, что 9 марта началась сильная магнитная буря (S2). В этих условиях вновь интенсифицировались возмущения ионизации в полярной ионосфере. В результате отношение $[O]/[N_2]$ ещё более уменьшилось на высотах верхней атмосферы в полярных областях. Область пониженного отношения $[O]/[N_2]$ распространилась на средние широты вплоть до низких в Западной полушарии на главной и восстановительной фазах бури S2 9 марта 2012 г. Это подтверждает вывод, сделанный в работе (Черниговская и др., 2022), что область максимальных вариаций геомагнитного поля Земли, а следовательно, и область повышенного проникновения возмущений из высоких широт в средние, для периода магнитных бурь марта 2012 г. отмечалась в Западной полушарии. В последующие дни, на восстановительной фазе сильной бури (S2) и в течение всего периода самой слабой в анализируемом периоде магнитной бури (S3) 12–14 марта, отмечалась тенденция к повышению отношения $[O]/[N_2]$ в области средних широт. Но с началом 15 марта 2012 г. умеренной магнитной бури (S4), которая помимо CMEs сопровождалась событием CH HSS с 16 по 18 марта, геомагнитная возмущённость в полярной области вновь возросла, что опять привело к формированию обширной области пониженного отношения $[O]/[N_2]$ 15 марта над регионами Дальнего Востока, Тихого океана и Северной Америки. К 16 марта эта область сместилась к региону Сибири, на следующий день 16 марта — к региону Европы и Атлантического океана, затем 17–18 марта — к американскому континенту в Западной полушарии.

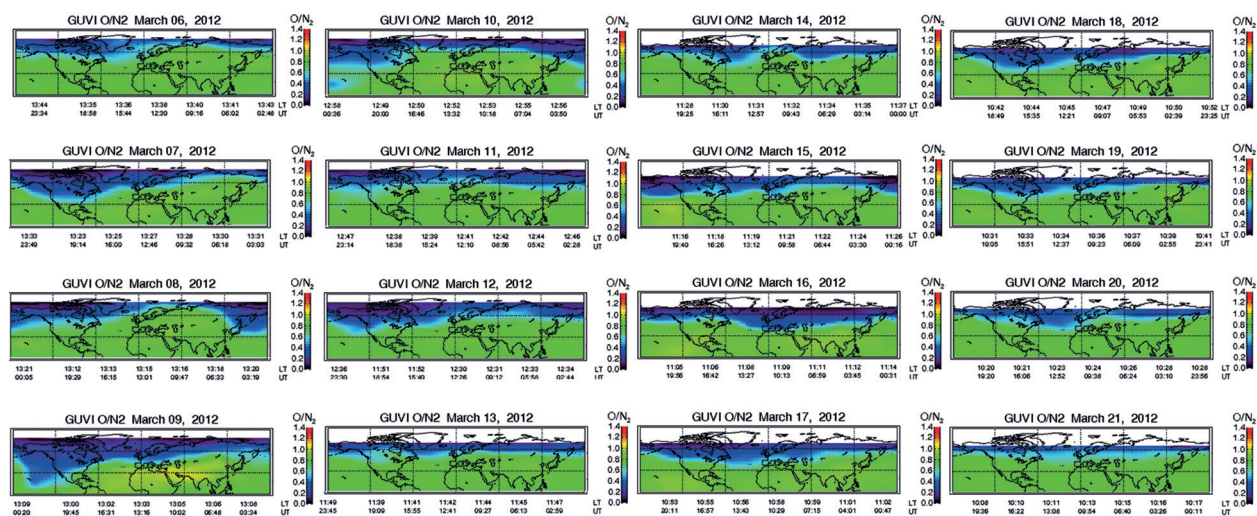


Рис. 3. Глобальное пространственное распределение отношения плотности $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы выше ~100 км по спутниковым измерениям GUVI TIMED для каждого дня 6–21 марта 2012 г. в Северном полушарии

Рисунок 4а (см. с. 308) показывает долготно-временные вариации абсолютного отклонения $df_o F2$ по данным цепи среднеширотных ионозондов. Вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты внезапного начала бурь (*англ.* Storm Sudden Commencement — SSC) в марте 2012 г., вызванные воздействием межпланетных ударных волн на магнитосферу Земли. Следует отметить, что были непродолжительные временные периоды отсутствия данных на ионозонде «Парус 3.0» в Екатеринбурге. Отсутствуют данные ионозонда АИС в Паратунке для 19 марта 2012 г. (показано серым цветом на рис. 4а).

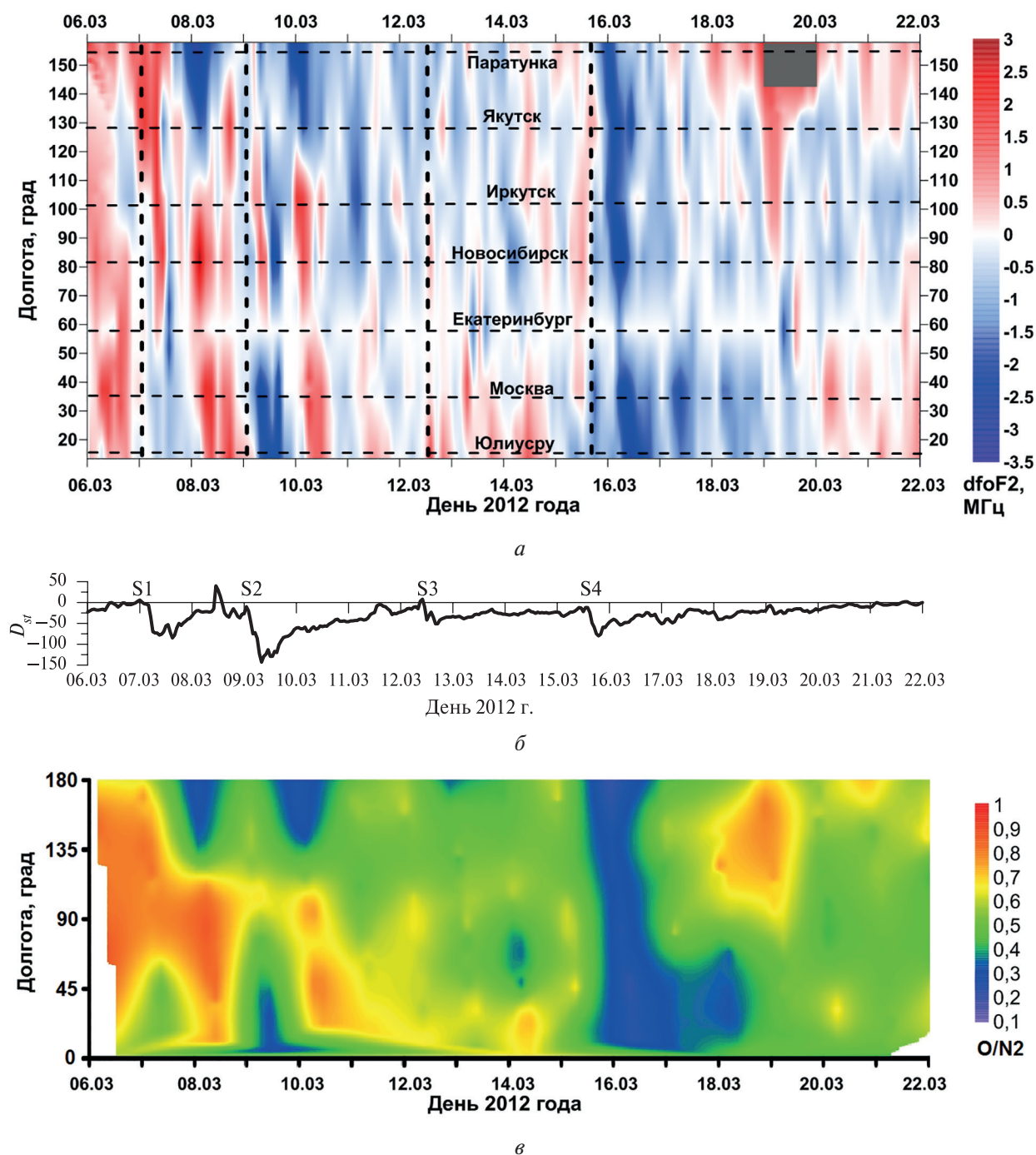


Рис. 4. Долготно-временные вариации абсолютного отклонения $df_o F2$ по данным среднеширотной цепи ионозондов (а); временные вариации индекса гелио-геомагнитной активности D_{st} (б); долготно-временное распределение отношения плотности $[O]/[N_2]$ по измерениям GUVI TIMED (в) в период серии бурь в марте 2012 г. (время UT)

Очевидна сложная картина отклика ионосферы на серию магнитных бурь, следовавших одна за другой в марте 2012 г., с переключением между положительной и отрицательной фазой ионосферной бури в один и тот же период магнитной бури для различных долготных областей. Для умеренной бури (S1) 7 марта 2012 г. над регионами Дальнего Востока и Европы эффекты ионосферной бури развивались в противофазе. Над регионом Дальнего Востока на главной фазе магнитной бури S1 наблюдалась положительная ионосферная буря (ионозонды в Паратунке и Якутске), которая затем на фазе восстановления магнитной бури сменилась отрицательной фазой ионосферной бури. Над регионом Урала и Европы (ионозонды

в Екатеринбурге, Москве и Юлиусру) сценарий был противоположный: отрицательную ионосферную бурю сменила положительная. Между этими долготными областями, над регионом Сибири, наблюдался положительный эффект ионосферной бури (ионозонды в Иркутске и Новосибирске) практически в течение всей магнитной бури (S1). Особенно сильное увеличение электронной концентрации в F -области ионосферы отмечалось над Новосибирском на восстановительной фазе магнитной бури 8 марта. Такое же увеличение f_oF2 фиксировалось 8 марта 2012 г. по данным ионозонда в Якутске. Возможно, это было проявление эффекта последствий магнитной бури (Ратовский и др., 2018; Klimenko et al., 2018), который состоит в формировании положительных возмущений электронной концентрации в дневное время через несколько дней после начала фазы восстановления.

Следующая сильная магнитная буря (S2), начавшаяся 9 марта 2012 г. ($D_{st} = -143$ нТл; $K_p = 8_0$), также вызвала различный ионосферный отклик в разных долготных областях. Над регионом Дальнего Востока в течение всей бури (S2) с 9 по 12 марта наблюдался эффект отрицательной ионосферной бури. Над регионом Европы реакция ионосферы на геомагнитное возмущение повторилась как для бури (S1): отрицательную ионосферную бурю сменила положительная. Над регионом Сибири на главной фазе магнитной бури (S2) первоначальная реакция ионосферы была положительной, затем сменилась кратковременно на отрицательную. На восстановительной фазе магнитной бури ионосферная буря вновь вступила в положительную фазу с последующим переходом в отрицательную фазу.

Магнитная буря (S3) 12 марта была самой слабой из серии мартовских бурь 2012 г. Ионосфера над Европой проявила эффект положительной ионосферной бури. Над азиатскими регионами Сибири и Дальнего Востока эффект ионосферной бури был отрицательным с последующим восстановлением ионосферы до уровня спокойных дней.

Очень интересной была реакция ионосферы средних широт над евразийским континентом на умеренную бурю ($D_{st} = -80$ нТл) (см. *рис. 4а*), начавшуюся 15 марта (S4). 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 в периоды главной и восстановительной фаз магнитной бури. Минимальные значения ионизации отмечены над регионом Западной Европы 16 марта 2012 г. по данным ионозонда в Юлиусру (см. *рис. 4а*). Отрицательная ионосферная буря продлилась вплоть до 20 марта над обширным регионом Евразии по данным ионозондов в Екатеринбурге, Москве и Юлиусру. С 20 марта ионизация ионосферы начала восстанавливаться до состояния невозмущённых дней. Над регионами Сибири (ионозонды в Иркутске и Новосибирске) и Дальнего Востока (ионозонд в Паратунке) процесс восстановления ионосферы начался раньше, чем над регионом Европы, — с 18 марта 2012 г. Как и для события бури (S1), возможно, рост ионизации в отдельном долготном регионе над азиатским континентом был проявлением эффекта последствий магнитных бурь (Ратовский и др., 2018; Klimenko et al., 2018).

Анализируя совместно *рис. 4а* и *б*, можно сделать вывод, что во время главной фазы каждой бури (S1–S4) долготная динамика геомагнитных и ионосферных возмущений оказывается почти синхронной в высоких и средних широтах и связана с глобальным перемещением зоны магнитосферной конвекции из высоких широт на средние.

На *рис. 4в* приведено долготно-временное распределение параметра $[O]/[N_2]$ для широтного диапазона $55–56^\circ$ с.ш. по спутниковым измерениям GUVI TIMED. Как упоминалось выше, сложные электродинамические процессы, протекающие в условиях повышенной геомагнитной активности в полярных широтах, приводят к сильному уменьшению отношения плотности $[O]/[N_2]$ атмосферы на высотах термосферы. Этот физический параметр выступает хорошим индикатором отрицательных фаз ионосферных бурь (Danilov, 2003; Klimenko et al., 2011; Laštovička, 2002; Liou et al., 2005; Prölss, Werner, 2002). Сравнивая вариации ионизации ионосферы на высоте $F2$ -слоя (см. *рис. 4а*) и нейтрального состава (см. *рис. 4в*), можно сделать заключение, что изменения этих параметров очень хорошо коррелируют. Очевидно, что именно вариации параметра отношения $[O]/[N_2]$ привели к вариациям электронной концентрации ионосферы, зарегистрированной ионозондами евразийской среднеширотной цепи

в период магнитных бурь в марте 2012 г. Все области минимальных значений отношения $[O]/[N_2]$ чётко совпадают с областями падения ионизации на высотах области $F2$ ионосферы (эффекты отрицательной ионосферной бури).

Перемещение крупномасштабных областей пониженного отношения $[O]/[N_2]$ в области средних широт Северного полушария, которое представлено на *рис. 3*, можно проследить и на *рис. 4в*. В период умеренной бури (S4), начавшейся 15 марта 2012 г., когда над всей территорией средних широт Евразии был отмечен эффект отрицательной ионосферной бури (см. *рис. 4а*), над всем евразийским континентом сформировалась обширная область пониженного отношения $[O]/[N_2]$. В последующие дни 16–17 марта область медленно перемещалась над регионом Европы в направлении Западного полушария (аналогично глобальному пространственному распределению на *рис. 3* для этих дней). Перемещаясь с азиатских регионов в европейские, область пониженного отношения $[O]/[N_2]$ вызывала уменьшение ионизации над Европой, тогда как в соседних долготных областях ионосферы над Сибирью и Дальним Востоком ионизация к этому времени восстановилась до значений в невозмущённых условиях.

Ионосферные эффекты длительного периода геомагнитных возмущений в марте 2012 г. анализировались в ряде работ (Belehaki et al., 2017; Habarulema et al., 2015, 2016; Verkhoglyadova et al., 2016). В публикации (Verkhoglyadova et al., 2016) исследованы ионосферные эффекты магнитной бури 15–18 марта 2012 г. (буря S4) также в связи с процессами в нейтральной атмосфере. Для анализа эффектов в системе ИТ использовались глобальные карты распределения вертикального ПЭС и данные измерений приборами GUVI и SABER (*англ.* Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) на спутнике TIMED, которые показали слабую временную реакцию ионизации на магнитную бурю в средних и низких широтах.

Переключение эффектов положительной и отрицательной ионосферной бури в период магнитных бурь 7–10 марта 2012 г., отмеченное в работах (Belehaki et al., 2017; Habarulema et al., 2015, 2016), может быть связано с совместным действием в исследуемых регионах низких и средних широт над Африкой и Европой конкурирующих процессов, воздействующих на ионизацию, источники которых находятся в авроральной и экваториальной ионосфере. Авторы работ связывают эффект положительной ионосферной бури с эффектом супер-фонтана в приэкваториальных широтах в период 7–10 марта 2012 г.

Численные расчёты с помощью модели ГСМ ТИП (глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы), а также статистический анализ данных среднеширотных ионозондов в Иркутске и Калининграде (Ратовский и др., 2018; Klimenko et al., 2018) показали, что причиной положительных возмущений электронной концентрации в дневное время через несколько дней после начала фазы восстановления магнитной бури может быть увеличение концентрации атомарного кислорода за счёт его переноса от экваториальных широт к средним на поздней восстановительной фазе. В свою очередь, этот перенос обусловлен дополнительным градиентом давления нейтрального газа от низких широт к высоким, возникающим в результате появления избыточной плотности нейтрального газа на низких широтах в главную фазу геомагнитной бури за счёт переноса кислорода от авроральных широт в сторону экватора. Значения ионизации при этом могут превышать уровень спокойных дней до начала магнитного возмущения. Авторы сравнивают возмущение $[O]/[N_2]$, равно как и возмущение электронной концентрации, с «колебаниям маятника», который переходит из отрицательной фазы в положительную в течение нескольких дней после начала фазы восстановления бури.

Образование обширных зон с повышенными значениями отношения плотности $[O]/[N_2]$ хорошо видно на *рис. 4в* над регионами Сибири, Урала и Европы на восстановительной фазе бури (S1), над регионами Урала и Европы на восстановительной фазе бури (S2), над регионами Сибири и Дальнего Востока на восстановительной фазе бури (S4). Этим зонам соответствуют области развития эффектов положительной ионосферной бури (см. *рис. 4а*). Можно согласиться с выводами авторов работ (Habarulema et al., 2015, 2016), что в период длительного геомагнитного возмущения в марте 2012 г. мы наблюдаем над регионами средних широт суперпозицию (наложение) взаимно конкурирующих процессов в системе ИТ, источни-

ки которых находятся в полярном и приэкваториальном регионах земного шара. Процессы, генерируемые в высоких широтах на главной фазе магнитной бури, запускают цепочку механизмов (усиление западной авроральной электроструи в области высоких широт, интенсивный джоулев нагрев нейтрального газа в нижней термосфере, увеличение скорости нейтрального ветра и усиление турбулентности в нижней термосфере, перераспределение нейтрального состава атмосферы). Эти процессы приводят к резкому уменьшению отношения плотности $[O]/[N_2]$ и, следовательно, к развитию отрицательных ионосферных бурь над регионами высоких и средних широт. На восстановительной фазе бури (через 2–4 дня после главной фазы) низкие значения ионизации над регионами средних широт могут быть обусловлены распространением атмосферной волны нейтрального газа с низким содержанием $[O]/[N_2]$ в западном направлении. Эта атмосферная волна формируется в нижней термосфере полярных широт за счёт высокой частоты столкновений молекулярных ионов и нейтралов и связана с протеканием в ночном секторе сильной западной электроструи на главной фазе магнитной бури. Такая волна приобретает большой пространственный масштаб и импульс и перемещается в средних широтах на большие расстояния даже при «выключении» ионосферного источника в авроральных широтах (см. рис. 3 и 4в).

Процессы, развивающиеся в период магнитной бури в приэкваториальных широтах (электрические поля быстрого проникновения (Danilov, 2013), эффект дневного супер-фонтана (Tsurutani et al., 2004), увеличение концентрации атомарного кислорода за счёт его переноса от экваториальных широт к средним (Ратовский и др., 2018; Klimenko et al., 2018)), ответственные за эффекты положительной ионосферной бури в средних широтах, маскируя эффекты отрицательных ионосферных бурь.

Таким образом, в конкретных гелио-геофизических условиях реализуется тот или иной преобладающий сценарий развития ионосферной бури.

Выводы

Исследование вариаций ионосферных и атмосферных параметров в Северном полушарии в период серии магнитных бурь в марте 2012 г. на основе анализа данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов и спутниковых измерений GUVI TIMED атмосферных составляющих на высотах термосферы (ионосферы) выше ~100 км позволило сделать следующие выводы.

Показано перемещение крупномасштабных областей пониженного отношения плотности $[O]/[N_2]$ над территорией средних широт Евразии в периоды восстановительных фаз умеренных магнитных бурь 7 и 15 марта 2012 г. Двигаясь в западном направлении из азиатских регионов в европейские, область пониженного отношения $[O]/[N_2]$ вызывала уменьшение ионизации над Европой, тогда как в соседних долготных областях ионосферы над Сибирью и Дальним Востоком ионизация к этому времени уже восстанавливалась до значений в невозмущённых условиях.

Совместный анализ пространственно-временных вариаций плотности ионизации в максимуме $F2$ -области ионосферы и отношения плотности $[O]/[N_2]$ в столбе термосферного газа выше ~100 км по данным спутниковых измерений GUVI TIMED для средних широт Восточного полушария показал высокую корреляцию изменения анализируемых параметров ионосферы и атмосферы.

Подчёркнута сложная физика длительного магнито-возмущённого периода в марте 2012 г. с переключением между положительной и отрицательной фазой ионосферной бури в один и тот же период магнитной бури для различных пространственных областей. Развивающийся сценарий отклика ионосферы в области средних широт на серию магнитных бурь в марте 2012 г. зависит от суперпозиции (наложения) взаимно конкурирующих процессов в системе ИТ, связанных со смещением области главного ионосферного провала к экватору, с эффектом экваториального супер-фонтана, сформировавшегося в период магнитных бурь 7–10 марта 2012 г., а также с динамикой глобальных перемещений областей пониженного

или повышенного отношения плотности $[O]/[N_2]$ в зональном и меридиональном направлениях над исследуемым регионом средних широт Евразии.

Для событий умеренных магнитных бурь 7 и 15 марта 2012 г. отмечался существенный рост ионизации на восстановительных фазах магнитных бурь над регионами Сибири и Дальнего Востока (по данным ионозондов в Новосибирске и Якутске — с 8 марта 2012 г.; по данным ионозондов в Новосибирске, Иркутске и Паратунке — с 18 марта 2012 г.). Подобное возрастание ионизации можно рассматривать как проявление эффекта последействия магнитных бурь.

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

Выражаем благодарность нашим коллегам Ратовскому К. Г. (ИСЗФ СО РАН, Иркутск), Белинской А. Ю. (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск), Степанову А. Е. (Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск), Бычкову В. В. (Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН, пгт. Паратунка), Григорьевой С. А. (Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича, Уральское отделение РАН, Екатеринбург), Панченко В. А. (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, Москва), Мелич Й. (Институт атмосферной физики, Кюлунгсборн, Германия) за предоставленные для анализа данные измерений ионозондов.

Литература

1. Поляков В. М., Шепкин Л. А., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.
2. Ратовский К. Г., Клименко М. В., Клименко В. В., Чирик Н. В., Коренькова Н. А., Котова Д. С. Эффекты последействий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 32–42. DOI: 10.12737/szf-44201804.
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., Хабитуев Д. С., Ратовский К. Г., Белинская А. Ю., Степанов А. Е., Бычков В. В., Григорьева С. А., Панченко В. А., Мелич Й. Исследование отклика среднеширотной ионосферы северного полушария на магнитные бури в марте 2012 года // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 4. (В печати.)
5. Astafjeva E. I. Dayside ionospheric uplift during strong geomagnetic storms as detected by the CHAMP, SAC-C, TOPEX and Jason-1 satellites // Advances in Space Research. 2009. V. 43. P. 1749–1756. DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.036.
6. Belehaki A., Kutiev I., Marinov P., Tsagouri I., Koutroumbas K., Elias P. Ionospheric electron density perturbations during the 7–10 March 2012 geomagnetic storm period // Advances in Space Research. 2017. V. 59. P. 1041–1056. DOI: 10.1016/j.asr.2016.11.031.
7. Buonsanto M. J. Ionospheric storms — a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.
8. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Yasyukevich A. S., Khabituiev 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.
9. Christensen A. B., Paxton L. J., Avery S., Craven J., Crowley G., Humm D. C., Kil H., Meier R. R., Meng C.-I., Morrison D., Ogorzalek B. S., Straus P., Strickland D. J., Swenson R. M., Walterscheid R. L., Wolven B., Zhang Y. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) on the NASA TIMED satellite mission // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. No. A12. Art. No. 1451. 16 p. DOI: 10.1029/2003JA009918.

10. Danilov A. D. Long-term trends of foF2 independent on geomagnetic activity // *Annales Geophysicae*. 2003. V. 21. No. 5. P. 1167–1176.
11. Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Advances in Space Research*. 2013. V. 52. P. 343–366. DOI: 10.1016/j.asr.2013.04.019.
12. 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.
13. 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.
14. 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. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. P. 6914–6929. DOI: 10.1002/2015JA021066.
15. Habarulema J. B., Katamzi Z. T., Yizengaw E., Yamazaki Y., Seemala G. Simultaneous storm time equatorward and poleward large-scale TIDs on a global scale // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43. P. 6678–6686. DOI: 10.1002/2016GL069740.
16. 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 low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // *Radio Science*. 2011. Art. No. RS0D03. DOI: 10.1029/2010RS004590.
17. 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.
18. 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.
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. Art. No. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.
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. 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.
22. Mayr H. G., Volland H. Magnetic storm effects in the neutral composition // *Planetary and Space Science*. 1972. V. 20. P. 379–393.
23. 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.
24. Prölss G. W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. No. A2. P. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.
25. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1998. V. 60. P. 1385–1402.
26. Schunk R. W., Sojka J. J. Ionosphere-thermosphere space weather issues // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1996. V. 58. P. 1527–1574. DOI: 10.1016/0021-9169(96)00029-3.
27. Seaton M. J. A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1956. V. 8. P. 122–124.
28. 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.
29. Tsurutani B., Mannucci A., Iijima B., Abdu M. A., Sobral J. H. A., Gonzalez W., Guarneri F., Tsuda T., Saito A., Yumoto K., Fejer B., Fuller-Rowell T. J., Kozyra J., Foster J. C., Coster A., Vasyliunas V. M. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields // *J. Geophysical Research*. 2004. V. 109. Art. No. A08302. DOI: 10.1029/2003JA010342.
30. Tsurutani B., Echer E., Shibata K., Verkhoglyadova O., Mannucci A., Gonzalez W., Kozyra J., Pätzold M. The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAWSES II overview // *J. Space Weather and Space Climate*. 2014. V. 4. No. A02. DOI: 10.1051/swsc/2013056.
31. Verkhoglyadova O. P., Tsurutani B. T., Mannucci A. J., Mlynarczyk M. G., Hunt L. A., Paxton L. J., Komjathy A. Solar wind driving of ionosphere-thermosphere responses in three storms near St. Patrick's Day in 2012, 2013, and 2015 // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. P. 8900–8923. DOI: 10.1002/2016JA022883.

Response of the ionosphere – thermosphere system over the mid-latitude region of Eurasia to geomagnetic storms in March 2012

M. A. Chernigovskaya, B. G. Shpynev, D. S. Khabituev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: cher@iszf.irk.ru

A study of variations in ionospheric and atmospheric parameters in the Northern Hemisphere during a series of magnetic storms in March 2012 was performed based on the analysis of data from the Eurasian mid-latitude ionosonde chain and GUVI TIMED satellite measurements of atmospheric components at altitudes of the thermosphere (ionosphere) above ~100 km. The longitudinal inhomogeneity of the ionospheric ionization over the mid-latitude region of Eurasia at the heights of the maximum F2-layer of the ionosphere is shown. The spatio-temporal variations in the [O]/[N₂] density ratio in the thermospheric gas column above ~100 km are analyzed according to GUVI TIMED satellite measurements for the Northern Hemisphere in whole and additionally for the middle latitudes of the Eastern Hemisphere. The complex physics of the long magnetically disturbed period in March 2012 with switching between the positive and negative phases of the ionospheric storm in the same period of the magnetic storm for different spatial regions is emphasized. Possible mechanisms for changing the effects of an ionospheric storm under the conditions of a series of magnetic storms in March 2012 are discussed.

Keywords: chain of ionosondes, ionospheric disturbances, geomagnetic storm, variations in the gas composition of the thermosphere

Accepted: 14.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-305-315

References

1. Polyakov V. M., Shchepkin L. A., Kazimirovsky E. S., Kokourov V. D., *Ionosfernye protsessy* (Ionospheric processes), Novosibirsk: Nauka, 1968, 535 p. (in Russian).
2. Ratovsky K. G., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Chirik N. V., Korenkova N. A., Kotova D. S., After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation, *J. Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 4, No. 4, pp. 26–32, DOI: 10.12737/stp-44201804.
3. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., 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 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., Khabituev D. S., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Melich J., Studying the response of the mid-latitude ionosphere of the northern hemisphere to magnetic storms in March 2012, *J. Solar-Terrestrial Physics*, 2022, Vol. 8, Issue 4. (In press.)
5. Astafyeva E. I., Dayside ionospheric uplift during strong geomagnetic storms as detected by the CHAMP, SAC-C, TOPEX and Jason-1 satellites, *Advances in Space Research*, 2009, Vol. 43, pp. 1749–1756, DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.036.
6. Belehaki A., Kutiev I., Marinov P., Tsagouri I., Koutroumbas K., Elias P., Ionospheric electron density perturbations during the 7–10 March 2012 geomagnetic storm period, *Advances in Space Research*, 2017, Vol. 59, pp. 1041–1056, DOI: 10.1016/j.asr.2016.11.031.
7. Buonsanto M. J., Ionospheric storms — a review, *Space Science Reviews*, 1999, Vol. 88, pp. 563–601.
8. 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.
9. Christensen A. B., Paxton L. J., Avery S., Craven J., Crowley G., Humm D. C., Kil H., Meier R. R., Meng C.-I., Morrison D., Ogorzalek B. S., Straus P., Strickland D. J., Swenson R. M., Walterscheid R. L., Wolven B., Zhang Y., Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) on the NASA TIMED satellite mission, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, No. A12, Art. No. 1451, 16 p., DOI: 10.1029/2003JA009918.

10. Danilov A. D., Long-term trends of foF2 independent on geomagnetic activity, *Annales Geophysicae*, 2003, Vol. 21, No. 5, pp. 1167–1176.
11. Danilov A. D., Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances, *Advances in Space Research*, 2013, Vol. 52, pp. 343–366, DOI: 10.1016/j.asr.2013.04.019.
12. 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.
13. 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.
14. 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. Geophysical Research*, 2015, Vol. 120, pp. 6914–6929, DOI: 10.1002/2015JA021066.
15. Habarulema J. B., Katamzi Z. T., Yizengaw E., Yamazaki Y., Seemala G., Simultaneous storm time equatorward and poleward large-scale TIDs on a global scale, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, pp. 6678–6686, DOI: 10.1002/2016GL069740.
16. 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 low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, *Radio Science*, 2011, Art. No. RS0D03, DOI: 10.1029/2010RS004590.
17. 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, Vol. 180, pp. 78–92, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.017.
18. 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.
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, Art. No. A05309, DOI: 10.1029/2004JA010840.
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. 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.
22. Mayr H. G., Volland H., Magnetic storm effects in the neutral composition, *Planetary and Space Science*, 1972, Vol. 20, pp. 379–393.
23. 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.
24. 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, p. 1016, DOI: 10.1029/2001JA900126.
25. Rishbeth H., How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, Vol. 60, pp. 1385–1402.
26. Schunk R. W., Sojka J. J., Ionosphere-thermosphere space weather issues, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1996, Vol. 58, pp. 1527–1574, DOI: 10.1016/0021-9169(96)00029-3.
27. Seaton M. J., A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms, *J. Atmospheric Terrestrial Physics*, 1956, Vol. 8, pp. 122–124.
28. 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.
29. Tsurutani B., Mannucci A., Iijima B., Abdu M. A., Sobral J. H. A., Gonzalez W., Guarneri F., Tsuda T., Saito A., Yumoto K., Fejer B., Fuller-Rowell T. J., Kozyra J., Foster J. C., Coster A., Vasyliunas V. M., Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields, *J. Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, Art. No. A08302, DOI: 10.1029/2003JA010342.
30. Tsurutani B., Echer E., Shibata K., Verkhoglyadova O., Mannucci A., Gonzalez W., Kozyra J., Pätzold M., The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7–17 March 2012 interval: a CAWSES II overview, *J. Space Weather and Space Climate*, 2014, Vol. 4, No. A02, DOI: 10.1051/swsc/2013056.
31. Verkhoglyadova O. P., Tsurutani B. T., Mannucci A. J., Mlynarczyk M. G., Hunt L. A., Paxton L. J., Komjathy A., Solar wind driving of ionosphere-thermosphere responses in three storms near St. Patrick's Day in 2012, 2013, and 2015, *J. Geophysical Research*, 2016, Vol. 121, pp. 8900–8923, DOI: 10.1002/2016JA022883.