

УДК 550.388.2

## О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ПЕРИОД СЛОЖНОГО ГЕЛИО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА

© 2021 г. М. В. Клименко<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Клименко<sup>1</sup>, Ф. С. Бессараб<sup>1</sup>, А. В. Тимченко<sup>1,3</sup>, И. А. Миронова<sup>2</sup>, Е. В. Розанов<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>4</sup>Физико-метеорологическая обсерватория Давос, Давос, Швейцария

\*maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2021 г.

После доработки 02.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе представлены результаты модельных расчетов поведения ионосферы в период сложного события космической погоды, которое произошло в сентябре 2017 г. Основное внимание уделено анализу отклика интегральной характеристики ионосферы – Глобального электронного содержания (ГЭС) на геомагнитные бури 7–8.IX. Сравнение временного поведения модельного и экспериментального ГЭС показало хорошее качественное соответствие временных вариаций ГЭС, связанных с геомагнитными бурями. В то же время, отмечается отсутствие в результатах модельных расчетов положительных возмущений ГЭС, наблюдавшихся 7, 8 и 11.IX. Предполагается, что эти положительные возмущения ГЭС в указанные дни могут быть связаны с наблюдавшимися, но не учтенными в модельных расчетах солнечными протонными событиями и высыпаниями протонов из магнитосферы.

DOI: 10.31857/S0023420621060042

### ВВЕДЕНИЕ

Предыдущие исследования ионосферного отклика на геомагнитные бури показали, что даже в случае изолированных бурь, произошедших в одни и те же сезоны и приблизительно в одно и то же время суток, ионосферные отклики могут существенно отличаться друг от друга [1, 2]. Причиной таких отличий могут являться ионосферные возмущения, связанные с явлениями, происходящими в нижней и средней атмосфере [3–6], а также с различными явлениями космической погоды (солнечными затмениями, вспышками и т.д.) [7, 8]. Солнечные вспышки и солнечные протонные события чаще всего предшествуют геомагнитным бурям, а в периоды повышенной активности Солнца они могут наблюдаться одновременно с геомагнитными бурями [7, 9, 10]. В данной статье будет рассмотрен ионосферный отклик на сложное гелио-геофизическое событие в сентябре 2017 г., включающее в себя геомагнитные бури, солнечные вспышки различных классов и солнечные протонные события.

В качестве характеристики ионосферного отклика на указанное сложное явление космиче-

ской погоды мы рассмотрели возмущения полного электронного содержания (ПЭС). ПЭС является одним из наиболее важных и часто используемым ионосферным параметром, представляющим собой проинтегрированную от поверхности Земли до высоты пролетов спутников Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) электронную концентрацию в вертикальном столбе единичной площади. На основе данных глобальных ионосферных карт ПЭС может быть рассчитано глобальное электронное содержание. ГЭС эквивалентно общему числу электронов в ионосфере Земли до высот орбит навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС (~20000 км) [11]. Впервые данный параметр был предложен в работе [12], а идея его использования в геофизических исследованиях и метод расчета ГЭС были представлены в [13]. Проведенные исследования показали, что вариации глобального электронного содержания хорошо коррелируют с динамикой УФ-излучения Солнца [12]. В работах [14, 15] был получен отклик глобального электронного содержания на геомагнитные бури. Было показано, что глобальное электронное содержание превышает

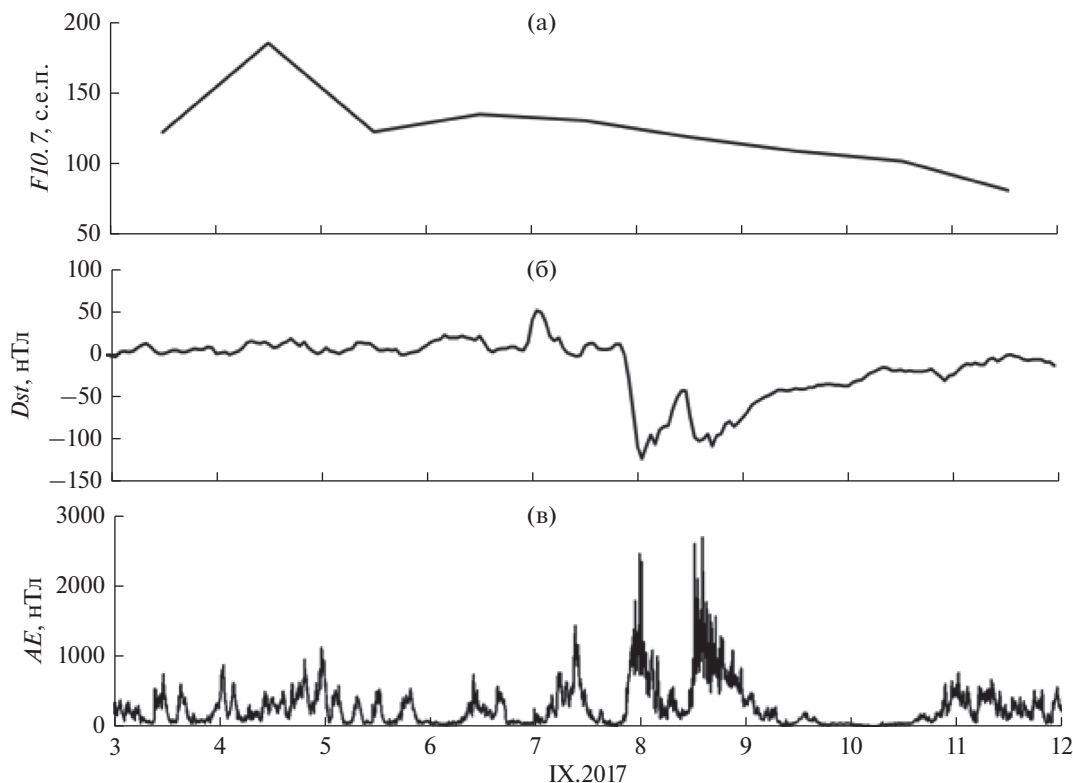


Рис. 1. Временной ход индексов солнечной и геомагнитной активности.

фоновые значения в течении  $\sim 24$  ч на 10–20%, после чего возникает отрицательная фаза с пониженными на 10–20% значениями ГЭС в течение  $\sim 40$  ч на фазе восстановления. Chen et al. [16] показали значимую корреляцию (более 0.8) отклика глобального электронного содержания на слабую геомагнитную возмущенность в условиях глубокого минимума солнечной активности 2007–2009 гг., притом, что в 2003–2005 гг. во время сильных геомагнитных бурь корреляция отклика ГЭС и индекса  $Ap$  на малых временных масштабах (несколько часов) практически отсутствовала. Статистический анализ показал, что детерминированная и случайная компоненты отклика глобального электронного содержания на геомагнитные бури примерно равны [17]. Это можно частично объяснить наличием других явлений космической погоды, предшествующих и/или сопровождающих геомагнитные бури. Данная статья представляет собой попытку рассмотреть отклик ГЭС на целый комплекс событий космической погоды (солнечные вспышки, солнечные протонные события и геомагнитные бури), которые имели место в сентябре 2017 г.

#### ГЕЛИО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

На рис. 1 показано поведение индексов солнечной ( $F10.7$ ) (а) и геомагнитной ( $Dst$ ,  $AE$ ) (б и в, соответственно) активности 3–11.IX.2017. Видно, что в этот период имели место две геомагнитные бури: 7 и 8.IX. Во время первой бури  $Dst$  и  $AE$  ин-

дексы достигали своих экстремальных значений –130 и 2600 нТл, соответственно. Во время второй бури экстремальные значения  $Dst$  и  $AE$  достигали, соответственно, –120 и 2800 нТл. Следует отметить, что этим двум бурям предшествовал довольно продолжительный относительно спокойный геомагнитный период 3–6.IX.2017, в течение которого, однако, имели место значительные изменения индекса солнечной активности  $F10.7$ . Изменения индекса  $F10.7$  4–6.IX были связаны с целым набором солнечных вспышек  $M$  и  $X$  класса, произошедших за рассматриваемый период и характеризующихся увеличением потоков рентгеновского излучения (смотри рис. 2). Кроме сильных геомагнитных бурь и солнечных вспышек за рассматриваемый период были зарегистрированы увеличения потоков солнечных и магнитосферных протонов различных энергий в периоды 5, 6–8 и 10–11.IX (смотри рис. 2). Анализ солнечной и геомагнитной обстановки показал, что 6–7.IX, а также 10–11.IX.2017 после вспышек и выбросов корональных масс были зафиксированы высыпания в основном солнечных протонов. В остальной период времени (7–9.IX.2017) появление высыпаний протонов связано с геомагнитными возмущениями. На рис. 2 показаны только выборочные интегральные энергии потоков протонов, зафиксированные  $GOES 15$ . Измерения частиц, детектируемых каналами  $MAGPD/MAGED GOES$  с энергиями от 80 кэВ, требуют дополнительной ка-

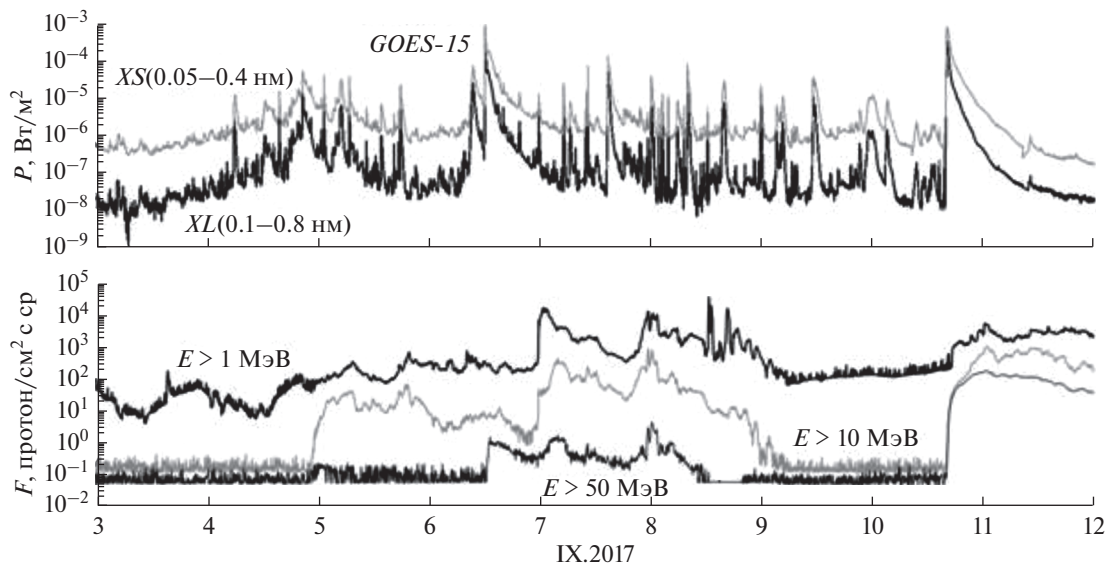


Рис. 2. Временные вариации потоков рентгеновского излучения (в двух полосах) и потоков протонов различных энергий.

либровки, что выходит за рамки данной статьи. Только 3.IX при относительно спокойной геомагнитной активности солнечные вспышки не наблюдались, что и определило выбор фоновых значений рассматриваемых ионосферных параметров перед бурями именно за этот день. Итак, в данном исследовании рассматривались ионосферные возмущения, связанные с изменениями индекса  $F10.7$  и геомагнитными бурями, в период с 4 по 11.IX.2017.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

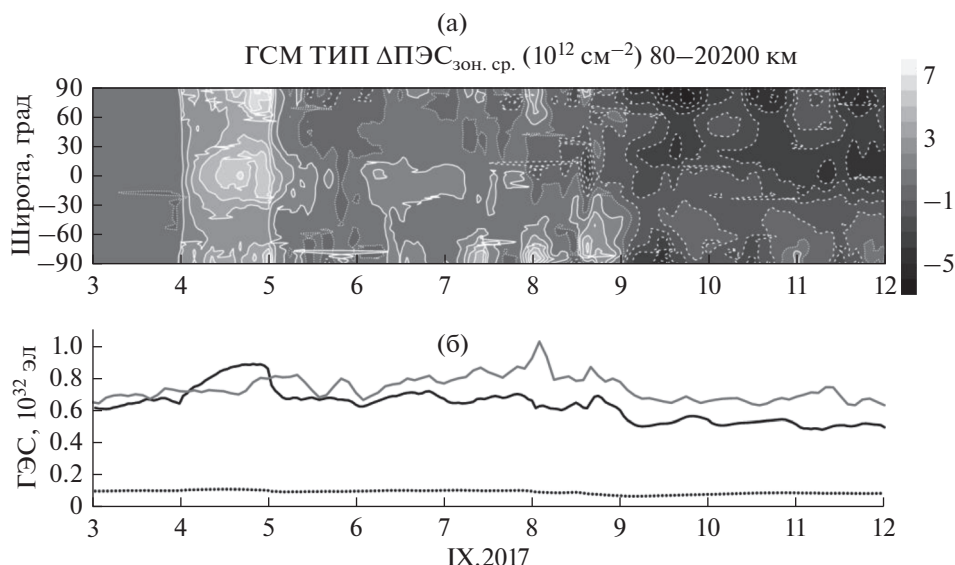
В этом исследовании расчеты проводилось на основе Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [18, 19]. В модели ГСМ ТИП осуществляется численное интегрирование системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральной и заряженной компонент многокомпонентной смеси газов, а также трехмерного уравнения, описывающего закон сохранения полного тока в ионосфере. В качестве параметров, определяющих воздействие геомагнитных возмущений на верхнюю атмосферу, в модели ГСМ ТИП используются разность потенциалов через полярные шапки, продольные токи второй зоны и высыпания высокоэнергичных электронов в авроральной области. Разность потенциалов через полярные шапки  $\Delta\Phi$  в данных расчетах задавалась на основе ее эмпирической зависимости от индекса геомагнитной активности  $AE$  [20]. Потенциал на геомагнитных широтах  $\pm 75^\circ$  задавался изменяющимся по гармоническому закону относительно местного магнитного времени с максимумом на утренней и минимумом на вечерней стороне. При этом не учитывались изменения размеров полярных шапок и, следовательно, положения ее эква-

ториальной границы во время возмущений. Величина продольных токов второй зоны задавалась согласно [21]. Положение максимумов продольных токов второй зоны, вытекающих на утренней стороне и втекающих на вечерней стороне, задавалось согласно Sojka et al. [22] в зависимости от задаваемой разности потенциалов через полярные шапки на геомагнитных широтах от  $\pm 65^\circ$  при  $\Delta\Phi \leq 40$  кВ до  $\pm 35^\circ$  при  $\Delta\Phi > 200$  кВ. Кроме того, согласно [23], учитывалась 30-минутная временная задержка вариаций токов второй зоны относительно вариаций разности потенциалов через полярные шапки. Высыпания авроральных электронов рассчитывались по модели [24], разработанной в Полярном геофизическом институте КНЦ РАН. Потоки солнечного КУФ-излучения рассчитывались в соответствии с моделью, предложенной Нусиновым и Бруевич [25], зависящей от среднесуточного значения индекса  $F10.7$ .

Следует отметить, что за рассматриваемый период времени наблюдалось несколько солнечных вспышек различного класса. Однако, при рассмотрении возмущений ГЭС и среднезональных значений ПЭС с двухчасовым временным разрешением эффектами солнечных вспышек можно пренебречь из-за их кратковременности и привязки исключительно к дневному времени суток. Также в модельных расчетах не учитывались эффекты потоков протонов различных энергий. Для сравнения полученных результатов модельных расчетов с данными наблюдений мы использовали временные вариации ГЭС, взятые с сайта <https://simurg.iszf.irk.ru/>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования глобального ионосферного отклика на сложное явление космической погоды



**Рис. 3.** Временное развитие ионосферных параметров: (а) широтные профили возмущений среднезонального ПЭС, рассчитанные по модели ГСМ ТИП (пунктирными линиями отмечена смена знака возмущения); (б) глобальное электронное содержание по данным наблюдений (серая линия) и результатам расчетов модели ГСМ ТИП (черная линия). Пунктирной кривой показано плазмосферное электронное содержание, рассчитанное в модели ГСМ ТИП.

в период с 3 по 11.IX.2017 нами были рассмотрены рассчитанные в модели ГСМ ТИП временные вариации ГЭС и широтные распределения возмущений среднезональных значений ПЭС (рис. 3). Из временного поведения широтных профилей среднезональных значений возмущений ПЭС видно, что: 1) в течении всех суток 4.IX формируются значительные положительные возмущения ПЭС с максимумом на экваторе; 2) в периоды главных фаз геомагнитных бурь 7 и 8.IX имели место высокоширотные положительные возмущения среднезональных ПЭС; 3) в период с 9 по 11.IX формируются отрицательные возмущения ПЭС с наибольшими возмущениями в северном полушарии.

На рис. 3, кроме рассчитанной по модели ГСМ ТИП временной изменчивости ГЭС (ГЭС<sub>м</sub>) представлено также временное развитие ГЭС по данным наблюдений (ГЭС<sub>э</sub>). Сравнение результатов расчетов модели ГСМ ТИП с данными наблюдений выявляет как сходства, так и различия. Из сходств модельных и наблюдаемых временных изменений ГЭС можно выделить: 1) общий характер изменений ГЭС<sub>м</sub> и ГЭС<sub>э</sub> за рассматриваемый период и, особенно, нисходящий тренд после 8.IX, связанный с похожим трендом в поведении потоков солнечного КУФ, который виден в вариациях индекса  $F10.7$  (рис. 1а); 2) хорошее соответствие изменений ГЭС<sub>м</sub> и ГЭС<sub>э</sub> в период 8–9.IX (особенно хочется выделить временной интервал второй половины 8.IX, который характеризовался наибольшими изменениями ГЭС, связанными с геомагнитной бурей). Во второй половине 8.IX во время второй геомагнитной бури формируется заметный положительный эффект в ГЭС, сменя-

ющийся продолжительным сильным отрицательным эффектом. Такое поведение ГЭС соответствует морфологическим представлениям его поведения во время геомагнитной бури [16].

Основными различиями модельных и наблюдаемых временных изменений ГЭС являются: 1) несовпадение по времени роста ГЭС<sub>м</sub> и ГЭС<sub>э</sub> 4.IX, которое легко объясняется тем, что в модели в течение всего этого дня задавался один и тот же наивысший уровень солнечной активности ( $F10.7 = 185$ ), тогда как в реальности, согласно информации, взятой с сайта [https://tesis.lebedev.ru/en/sun\\_flares.html](https://tesis.lebedev.ru/en/sun_flares.html), и по данным *GOES-15* (см. рис. 2), солнечные вспышки наблюдались во второй половине 4.IX; 2) отсутствие в модельных расчетах значительных положительных возмущений ГЭС, наблюдавшихся 5–8 и 11.IX.

Более слабый положительный эффект в ГЭС может быть вызван различными причинами. Ранее, в работе [10] мы исследовали ионосферные эффекты протонных событий и высыпаний магнитосферных протонов с помощью модели всей атмосферы EAGLE и показали, что протонные высыпания вызывают преимущественно положительные возмущения ПЭС, в том числе, и на экваторе, что может приводить к положительным возмущениям ГЭС. В рассматриваемых в настоящей работе результатах численных экспериментов, которые проводились на основе модели ГСМ ТИП, эффекты солнечных протонных событий и магнитосферных протонных высыпаний не учитывались. Таким образом, полученные нами отличия в вариациях экспериментального и модельного ГЭС, могут являться косвенным доказательством важности учета протонных высыпаний

в модельных расчетах для воспроизведения положительных ионосферных возмущений во время геомагнитных бурь, сопровождаемых солнечными протонными событиями. В пользу этого предположения говорит то, что наблюдаемые максимумы положительных возмущений ГЭС 7, 8, и 11.IX (отсутствующие в результатах расчетов по модели ГСМ ТИП) (рис. 3) формируются в эти дни в течение 3–6 ч после максимумов протонных высыпаний с энергиями больше 1 МэВ (рис. 2). Следует отметить, что данный вывод требует проверки, которую можно будет осуществить с помощью модели всей атмосферы EAGLE [10, 26] при учете протонных высыпаний.

Согласно результатам различных исследований вклад плазмосферы в ПЭС зависит от солнечной активности, сезона, широты, и момента местного времени [27–30]. Вклад плазмосферы в ПЭС на низких широтах в минимуме солнечной активности может достигать 40–50% [28, 29]. В последние годы стал широко подниматься вопрос об изменении вклада плазмосферы в ПЭС во время геомагнитных бурь [31–34]. Было, например, показано, что отклик в foF2 и ПЭС над одной и той же точкой в одно и то же время может отличаться по знаку возмущений за счет различного характера возмущений в ионосфере и плазмосфере [32–34]. Интерес представляет вклад плазмосферы в глобальное электронное содержание и изменение плазмосферного глобального электронного содержания во время геомагнитной бури. Для исследования данного вопроса, нами был получен плазмосферный (от 1000 до 20000 км) ГЭС по результатам расчетов модели ГСМ ТИП (смотри рис. 3). Видно, что в рассматриваемый период средней солнечной активности плазмосфера вносит вклад до ~15% в ГЭС в спокойных геомагнитных условиях. Можно отметить, что плазмосферный ГЭС по сравнению с полным ГЭС слабее реагирует на повышение солнечной активности во время солнечных вспышек. Также видно, что геомагнитные бури 7–9.IX в целом приводят к уменьшению плазмосферного и полного ГЭС. При этом вариативность полного ГЭС значительно больше вариативности плазмосферного ГЭС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования отклика глобального электронного содержания на сложное событие космической погоды (включающее солнечные вспышки, солнечные протонные события и геомагнитные бури), которое произошло 4–11.IX.2017. Показано, что эффекты геомагнитной бури 8–9.IX соответствуют морфологическим представлениям отклика ГЭС на геомагнитные возмущения и успешно воспроизводятся моделью системы термосфера-ионосфера. В то же время, отмечается отсутствие в результатах модельных расчетов, наблюдаемых 7, 8

и 11.IX положительных возмущений ГЭС. Предполагается, что эти положительные возмущения ГЭС могут быть связаны с наблюдаемыми, но не учтенными в модельных расчетах солнечными протонными событиями и высыпаниями протонов из магнитосферы. За рассматриваемый период средней солнечной активности плазмосфера вносит вклад до ~15% в ГЭС в спокойных геомагнитных условиях. Геомагнитные бури 7–9.IX в целом приводят к уменьшению плазмосферного и полного ГЭС. При этом вариативность полного ГЭС значительно больше вариативности плазмосферного ГЭС.

Исследование экстремального события космической погоды выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 20-67-46016 (И.А. Миронова, М.В. Клименко). Численное моделирование и интерпретация ионосферного отклика на геомагнитные бури и повышение солнечной активности выполнено при поддержке гранта РНФ 21-17-00208 (В.В. Клименко, Ф.С. Бессараб, А.В. Тимченко, Е.В. Розанов).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 32–42. <https://doi.org/10.12737/stp-44201804>
2. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V. et al. Statistical Analysis and Interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude Responses in Regional Electron Content to Geomagnetic Storms // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 1308. <https://doi.org/10.3390/atmos11121308>
3. Fuller-Rowell T., Akmaev R., Wu F. et al. Did the January 2009 sudden stratospheric warming cool or warm the thermosphere? // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L18104. <https://doi.org/10.1029/2011GL048985>
4. Goncharenko L., Chau J.L., Condor P. et al. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013 // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 4982–4986. <https://doi.org/10.1002/grl.50980>
5. Laskar F.I., Pallamraju D., Lakshmi T.V., Veenadhari B. Vertical coupling of atmospheres: dependence on strength of sudden stratospheric warming and solar activity // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66. P. 66–94. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-94>
6. Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю. и др. Изменения параметров средней и верхней атмосферы во время внезапного стратосферного потепления в январе 2013 г. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 5–16. <https://doi.org/10.12737/szf-43201801>
7. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G. et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Sci. 2011. V. 46. № RS0D03. <https://doi.org/10.1029/2010RS004590>

8. *Hoque M., Wenzel M., Jakowski D.N. et al.* Ionospheric response over Europe during the solar eclipse of March 20, 2015 // *J. Space Weather and Space Climate*. 2016. V. 6. A36. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016032>
9. *Qian L., Wang W., Burns A.G. et al.* Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11.IX.2017 // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2019. V. 124. P. 2298–2311. <https://doi.org/10.1029/2018JA026175>
10. *Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V. et al.* Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15–22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // *Advances in Space Research*. 2020. V. 67. Is. 1. P. 133–149. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.026>
11. *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V. et al.* Global electron content: a new conception to track solar activity // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. Is. 2. P. 335–344. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008>
12. *Афраимович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В.* Солнечная активность и глобальное электронное содержание // *ДАН*. 2006. Т. 409. № 3. С. 399–402.
13. *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Oinats A.V. et al.* Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling // *Advances in Space Res.* 2008. V. 42. P. 763. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.11.007>
14. *Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S.* Imaging Global Electron Content backwards in time more than 160 years ago // *Advances in Space Research*. 2014. V. 53. Is. 3. P. 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.036>
15. *Yenen S.D., Gulyaeva T.L., Arikani F., Arikani O.* Association of ionospheric storms and substorms of Global Electron Content with proxy AE index // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. № 7. P. 1343–1353. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.025>
16. *Chen Y., Liu L., Le H., Wan W.* Geomagnetic activity effect on the global ionosphere during the 2007–2009 deep solar minimum // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2014. V. 119. Is. 5. P. 3747–3754. <https://doi.org/10.1002/2013JA019692>
17. *Ратовский К.Г., Клименко М.В., Ясюкевич Ю.В. и др.* Статистический анализ ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных глобальных ионосферных карт // *Химическая физика*. 2020. Т. 39. № 10. С. 57–68.
18. *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al.* Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *PAGEOPH*. 1988. V. 127. № 2–3. P. 219–254.
19. *Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M. et al.* Calculated and observed ionospheric parameters for a Magon-2 passage and EISCAT data on July 31, 1990 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № A7. P. 14697–14710.
20. *Feshchenko E.Yu., Maltsev Yu.P.* Relations of the polar cap voltage to the geophysical activity // *Proc. 26 Annual Seminar – Physics of Auroral Phenomena*. 2003. P. 59–61.
21. *Lukianova R., Christiansen F.* Modeling of the global distribution of ionospheric electric field based on realistic maps of field-aligned currents // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A03213. <https://doi.org/10.1029/2005JA011465>
22. *Sojka J.J., Schunk R.W., Denig W.F.* Ionospheric response to the sustained high geomagnetic activity during the March'89 great storm // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № A11. P. 21341–21352.
23. *Kikuchi T., Hasimoto K.K., Nozaki K.* Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A06214. <https://doi.org/10.1029/2007JA012628>
24. *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I.* Empirical model of auroral precipitation power during substorms // *J. Atm. Solar-Ter. Phys.* 2008. V. 70. P. 654–662.
25. *Нусинов А.А., Бруевич Е.А.* Зависимость интенсивности линий коротковолнового солнечного излучения от уровня активности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1984. Т. 24. С. 529–536.
26. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al.* Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming // *J. Space Weather and Space Climate*. 2019. V. 9. A39. <https://doi.org/10.1051/swsc/2019037>
27. *Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D. et al.* Global plasmaspheric TEC and its relative contribution to GPS TEC // *J. Atm. Solar-Ter. Phys.* 2008. V. 70. P. 1541–1548. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.04.022>
28. *Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I.* Plasmaspheric electron content derived from GPS TEC and FORMOSAT-3/COSMIC measurements: Solar minimum condition // *Adv. Space Res.* 2012. V. 50. P. 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.002>
29. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak Iu.V.* The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. № 8. P. 2077–2085. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.02>
30. *Shim J.S., Jee G., Scherliess L.* Climatology of plasmaspheric total electron content obtained from Jason 1 satellite // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 1611–1623. <https://doi.org/10.1002/2016JA023444>
31. *Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E., Dzubanov D., Krankowski A.* Analysis of the ionosphere/plasmasphere electron content variability during strong geomagnetic storm // *Adv. Space Res.* 2014. V. 54. № 4. P. 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.011>
32. *Liu J., Wang W., Burns A. et al.* Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
33. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E. et al.* Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. P. 923–938. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017>
34. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V. et al.* 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. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 180. P. 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017>