

## СВЯЗЬ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ С АЕ-ИНДЕКСОМ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2015 г.

### CONNECTION OF TOTAL ELECTRON CONTENT DISTURBANCES WITH AE INDEX OF GEOMAGNETIC ACTIVITY DURING GEOMAGNETIC STORM IN MARCH 2015

**К.В. Белюченко**

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта,  
Калининград, Россия, kdei@list.ru*

**М.В. Клименко**

*Калининградский филиал Института земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пуш-  
кова РАН,  
Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru*

**В.В. Клименко**

*Калининградский филиал Института земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пуш-  
кова РАН,  
Калининград, Россия, vvk\_48@mail.ru*

**К.Г. Ратовский**

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

**K.V. Belyuchenko**

*Immanuel Kant Baltic Federal University,  
Kaliningrad, Russia, kdei@list.ru*

**M.V. Klimenko**

*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Mag-  
netism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,  
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru*

**V.V. Klimenko**

*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Mag-  
netism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,  
Kaliningrad, Russia, vvk\_48@mail.ru*

**K.G. Ratovsky**

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

**Аннотация.** Ионосферные эффекты геомагнитной бури 17 марта 2015 г. ранее исследовались на основе результатов расчетов Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [Dmitriev et al., 2017; Klimenko et al., 2018], не противоречащих экспериментальным данным. В данной работе были рассмотрены полученные в ГСМ ТИП возмущения полного электронного содержания (*ПЭС*, *TEC*) на разных долготах и зонально усредненные в период 17–23 марта 2015 г. Для всех долгот можно отметить наличие полосы положительных возмущений *TEC* вблизи геомагнитного экватора и эффекта последствия геомагнитной бури, который проявляется в виде положительных возмущений *TEC* на средних широтах на 3–5 сут после главной фазы геомагнитной бури. Нами были проанализированы зависимости возмущений параметров системы термосферы и ионосферы (*TEC*,  $n(N_2)$ ,  $n(O)$ ), зонального электрического поля, меридиональной компоненты термосферного ветра на высоте 300 км и температуры электронов на высоте 1000 км), рассчитанных по модели ГСМ ТИП, от вариаций АЕ-индекса геомагнитной активности. Анализ был проведен с использованием найденных по формуле Пирсона коэффициентов корреляции, которые были представлены в виде карт зависимостей коэффициента корреляции от момента времени УТ и широты для выбранных долгот и для зонально усредненных значений. Полученные результаты показывают, что на высоких широтах Северного и Южного полушарий, коэффициент корреляции возмущений *TEC* и изменений АЕ близок к единице на всех исследуемых долготах в период 12–23 УТ. В 9–12 УТ

**Abstract.** Ionospheric response to the March 17, 2015 geomagnetic storm has been investigated using simulations of the Global Self-consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, Protonosphere (GSM TIP) [Dmitriev et al., 2017; Klimenko et al., 2018]. GSM TIP demonstrates results that do not contradict experimental data. This paper deals with GSM TIP simulated disturbances in the Total Electron Content (*TEC*) at different longitudes and zonal averages on March 17–23, 2015. At all longitudes, we can observe the existence of a band of *TEC* positive disturbances, located over the geomagnetic equator, and the formation of an after-storm ionospheric effect that appeared as positive *TEC* disturbances at midlatitude 3–5 days after the geomagnetic storm main phase. We have analyzed the dependence of disturbances of the thermosphere-ionosphere system (total electron content,  $n(N_2)$ ,  $n(O)$ , zonal electric field, meridional component of the thermospheric wind at a height of 300 km, and electron temperature at a height of 1000 km), calculated by GSM TIP from variations in the geomagnetic activity index AE. The analysis is based on Pearson's correlation coefficients, presented as maps of the dependence of the correlation coefficient on UT and latitude for selected longitudes and for zonal averaged values. The results suggest that at high latitudes of the Northern and Southern hemispheres the correlation coefficient of *TEC* disturbances and AE variations is close to 1 at all longitudes in the period from 12 UT to 23 UT. From 9 UT to 12 UT, the minimum value of the correlation coefficient is observed at all latitudes and longitudes. The time intervals of the correlation values are associated with the features of a particular geomagnetic storm, for which, for example,

наблюдается минимальный коэффициент корреляции на всех исследуемых широтах и долготах. Временные интервалы корреляции связаны с особенностями конкретной геомагнитной бури, для которой, например, интервал 09–23 UT 17 марта 2015 г. соответствует главной фазе геомагнитной бури. Обсуждаются возможные механизмы формирования такой связи модельных возмущений  $TEC$  и  $AE$ .

**Ключевые слова:** геомагнитная буря, ионосферные возмущения, модель ГСМ ТИП.

## ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные возмущения (магнитные бури и суббури) являются одним из важнейших объектов исследования в солнечно-земной физике и представляют собой наиболее яркие события космической погоды. Интенсивность магнитосферного (геомагнитного) возмущения оценивается геомагнитными индексами  $K_p$  ( $A_p$ ),  $Dst$  и  $AE$ . Высокоширотный индекс  $AE$  характеризует интенсивность аврорального тока и является индикатором суббуревой активности [Davis, Sugiura, 1966]. Низкоширотный индекс  $Dst$  используется для оценки интенсивности кольцевого тока во время магнитных бурь и является мерой геоэффективности межпланетных возмущений [Sugiura, 1964; Burton et al., 1975]. В работах [Gonzalez et al., 1994, 1999] было дано определение геомагнитных бурь на основе поведения  $Dst$  и представлена классификация магнитных бурь в зависимости от их эффективности.

Процессы в магнитосфере посредством высыпаний энергичных частиц, джоулева нагрева, магнитосферно-ионосферных токов и электрических полей магнитосферного происхождения оказывают существенное влияние на ионосферу Земли [Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Pröls, 1995, 2013]. При исследовании ионосферного отклика на геомагнитные бури обычно рассматриваются возмущения, наблюдаемые в главную фазу бури, поскольку именно в этот период ионосферные возмущения наиболее интенсивны. Общеизвестно, что в высоких и средних широтах отрицательная фаза ионосферной бури обусловлена перераспределением температуры, состава и плотности термосферы в периоды магнитных бурь [Buonsanto, 1999; Mayr, Volland, 1973]. Ионосферный эффект от сильной геомагнитной бури может продолжаться несколько суток [Шпынев и др., 2018]. В последнее время активно обсуждается вопрос формирования ионосферных возмущений на фазе восстановления геомагнитных бурь [Balan et al., 2013; Suvorova et al., 2013]. Исследования ионосферного отклика на геомагнитные бури на основе статистического анализа, представленные в [Ратовский и др., 2018; Ratovsky et al., 2020], показали наличие ионосферных эффектов последствия геомагнитных бурь, интерпретация которых была осуществлена на основе результатов расчетов модели верхней атмосферы [Klimenko et al., 2017; Ратовский и др., 2018]. Статистические исследования показали также, что, несмотря на то, что общие закономерности

the interval from 12 UT to 23 UT on March 17, 2015 corresponds to the geomagnetic storm main phase. We discuss possible mechanisms for the formation of such a relationship between simulated  $TEC$  disturbances and the  $AE$  index.

**Keywords:** geomagnetic storm, ionospheric disturbances, GSM TIP.

поведения ионосферных параметров во время геомагнитных возмущений известны, ионосферные возмущения от события к событию могут значительно различаться.

В работе [Деминов и др., 2017] была предложена методика выделения вклада геомагнитной активности в медиану критической частоты F2-слоя,  $f_oF2$ , на средних широтах. На ее основе были получены зависимости  $f_oF2$  от  $A_p$ -индекса, усредненного за месяц, что обеспечивает возможность прогноза медианных значений  $f_oF2$  с учетом геомагнитной активности. Деминов и др. [2021] показали, что предложенное ими уравнение связи ионосферного параметра и индекса солнечной активности описывает 95–98 % вариаций ионосферного параметра, а остаток, зависящий от индексов геомагнитной активности (производных от  $A_p$ ) описывается линейной регрессией. Возможная зависимость ионосферного индекса от  $A_p$  обусловлена тем, что медиана  $f_oF2$  зависит не только от солнечной, но и от геомагнитной активности [Деминов и др., 2017]. Ягодкина и др. [2021] по данным среднеширотной ионосферной станции (Москва) исследовали зависимость  $f_oF2$  и высоты максимума F2-слоя,  $h_mF2$ , от уровня геомагнитной активности в период изолированной магнитной бури 22–23 июня 2015 г. Было показано, что наиболее чувствительным параметром, реагирующим на изменение внешних условий, является  $h_mF2$ . В предбуревой период с ростом геомагнитной активности уменьшается критическая частота и растет высота слоя F2. В главную фазу бури только  $h_mF2$  оказывается чувствительной к изменениям геомагнитной активности. На фазе восстановления бури уменьшение геомагнитной активности сопровождается ростом  $f_oF2$  и  $h_mF2$ .

Существенный вклад в понимание процессов формирования ионосферных вариаций, связанных с геомагнитной активностью, внесли теоретические исследования, выполненные с использованием различных численных моделей ионосферы [Pirog et al., 2006; Balan et al., 2009; Huba et al., 2017], а также более сложных моделей верхней атмосферы Земли [Namgaladze et al., 2000; Fuller-Rowell et al., 2007; Lu et al., 2008; Pawlowski et al., 2008]. Некоторый вклад в понимание ионосферной изменчивости во время геомагнитных возмущений внесли исследования, основанные на результатах расчетов, полученных с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [Klimenko et al., 2011; Dmitriev et al., 2017]. В ГСМ

ТИП учет геомагнитных возмущений осуществляется с использованием модели высыпаний авроральных электронов [Vorobjev, Yagodkina, 2008], а также эмпирической зависимости разности потенциалов через полярные шапки  $\Delta\Phi$  и широтного расположения продольных токов от геомагнитной активности [Sojka et al., 1994; Feshchenko, Maltsev, 2003]. В качестве меры геомагнитной активности в этих моделях использовались индексы  $AE$  и  $AL$  с 1-минутным временным разрешением, т. е.  $AE$  и  $AL$  являются управляющими параметрами ГСМ ТИП. Целью данной работы является изучение связи между возмущениями параметров системы термосфера—ионосфера, полученными по результатам расчетов ГСМ ТИП, и вариациями индексов геомагнитной активности (управляющих параметров модели) во время геомагнитной бури 17–23 марта 2015 г.

### ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО СОБЫТИЯ И МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье мы рассматриваем ионосферные эффекты геомагнитной бури, произошедшей в марте 2015 г. (буря святого Патрика), — самой мощной геомагнитной бури (по  $Dst$ ) в 24-м солнечном цикле. Этой буре посвящено множество научных статей, в 2017 г. был опубликован специальный выпуск Journal Geophysical Research, посвященный всевозможным аспектам исследования отклика околоземного космического пространства на геомагнитные бури марта 2013 и 2015 г. (краткий обзор этих исследований представлен в [Zhang et al., 2017]). Во время одной из этих бурь в 2015 г. в Восточно-Сибирском регионе было обнаружено не типичное для этого региона среднеширотное сияние [Михалев и др., 2018] и наличие двух разнесенных по широте стабильных красных дуг, различающихся по происходящим в них процессам нагрева [Золотухина и др., 2021]. На рис. 1 показаны вариации  $Dst$ ,  $AE$ ,  $AL$  16–23 марта 2015 г. Согласно поведению  $Dst$ , фаза внезапного начала бури наблюдалась 17 марта в ~06 UT, а главная фаза геомагнитной бури продлилась с 09 до 24 UT. Минимальное значение  $Dst = -223$  нТл было зафиксировано в ~23 UT. Максимальные (по модулю)

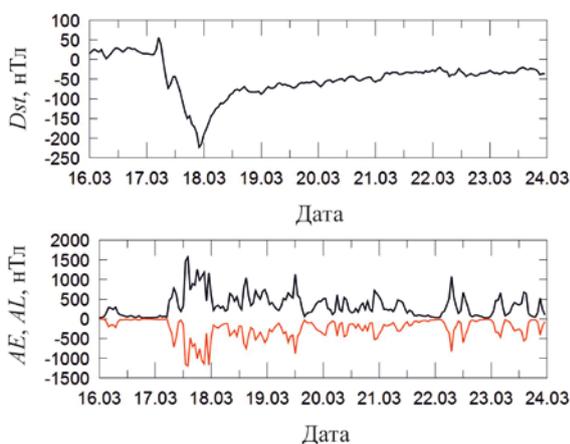


Рис. 1. Вариации индексов геомагнитной активности:  $Dst$  (вверху),  $AE$  и  $AL$  (внизу, черная и красная линии соответственно) 16–23 марта 2015 г.

значения  $AE$  и  $AL$  наблюдались около 14 UT и достигали 1200–1500 нТл. Восстановительная фаза геомагнитной бури была довольно продолжительной и содержала общую тенденцию уменьшения  $AE$  и  $AL$  в период до 22 марта.

На основе ГСМ ТИП были получены для периода 17–23 марта 2015 г. пространственно-временные зависимости возмущений (относительно фоновых значений, взятых за 16 марта 2015 г.)  $TEC$ ,  $n(N_2)$ ,  $n(O)$ , зонального электрического поля  $E_{зон}$ , скорости меридионального ветра  $V_{\text{вет}}$  для высоты 300 км и электронной температуры  $T_e$  для высоты 1000 км.

В данной работе для выявления возможной связи между параметрами системы термосфера—ионосфера и  $AE$  мы применили корреляционный анализ с использованием формулы Пирсона, которая предполагает наличие линейной зависимости между двумя рассматриваемыми величинами.

$$R_{x, AE}(UT, \theta) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(UT, \theta) - \overline{x(UT, \theta)}) (AE_i(UT) - \overline{AE(UT)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i(UT, \theta) - \overline{x(UT, \theta)})^2 \sum_{i=1}^n (AE_i(UT) - \overline{AE(UT)})^2}},$$

где  $\overline{AE(UT)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AE_i(UT)$  — среднее значение  $AE$  за рассматриваемые  $n$  дней для фиксированного момента UT;  $n=7$  — количество дней, используемых для расчета коэффициента корреляции;  $i$  — номер дня (17.03  $i=1$ , 18.03  $i=2$ , ..., 23.03  $i=7$ );  $x_i(UT, \theta)$  — значения параметров, рассчитанных на основе ГСМ ТИП;  $\overline{x(UT, \theta)}$  — средние значения параметров за рассматриваемые 7 дней, зависящие от UT и широты  $\theta$ . Если  $R=0$ , рассматриваемые величины являются линейно независимыми, при  $|R|=1$  имеют линейную зависимость. По полученным коэффициентам корреляции были построены широтно-временные зависимости  $R$  возмущений всех указанных выше параметров системы термосфера—ионосфера и  $AE$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 2 показаны вариации возмущений  $TEC$  на трех выбранных долготах ( $30^\circ E$ ,  $105^\circ E$ ,  $90^\circ W$ ), соответствующих Европейскому, Восточно-Сибирскому и Американскому секторам, и их зонально усредненных значений, получаемых усреднением рассматриваемого параметра по долготе для выбранного момента UT. Выбор долготных секторов связан с их различной удаленностью от Южного и Северного геомагнитных полюсов. В ГСМ ТИП используются следующие географические координаты Северного и Южного геомагнитных полюсов:  $78.6^\circ N$ ,  $69.5^\circ W$  и  $78.6^\circ S$ ,  $110.5^\circ E$  соответственно. Анализ карт зонально усредненных возмущений  $TEC$  показывает, что наибольшие возмущения формируются в главную фазу бури 17 марта с 09 до 24 UT на средних и высоких широтах ( $30^\circ N$ ,  $90^\circ N$ ) и ( $30^\circ S$ ,  $90^\circ S$ ). Во второй день в начале фазы восстановления отчетливо видны максимальные отрицательные возмущения на всех широтах с максимумами в окрестностях обоих полюсов и на экваторе. Начиная с 00 UT

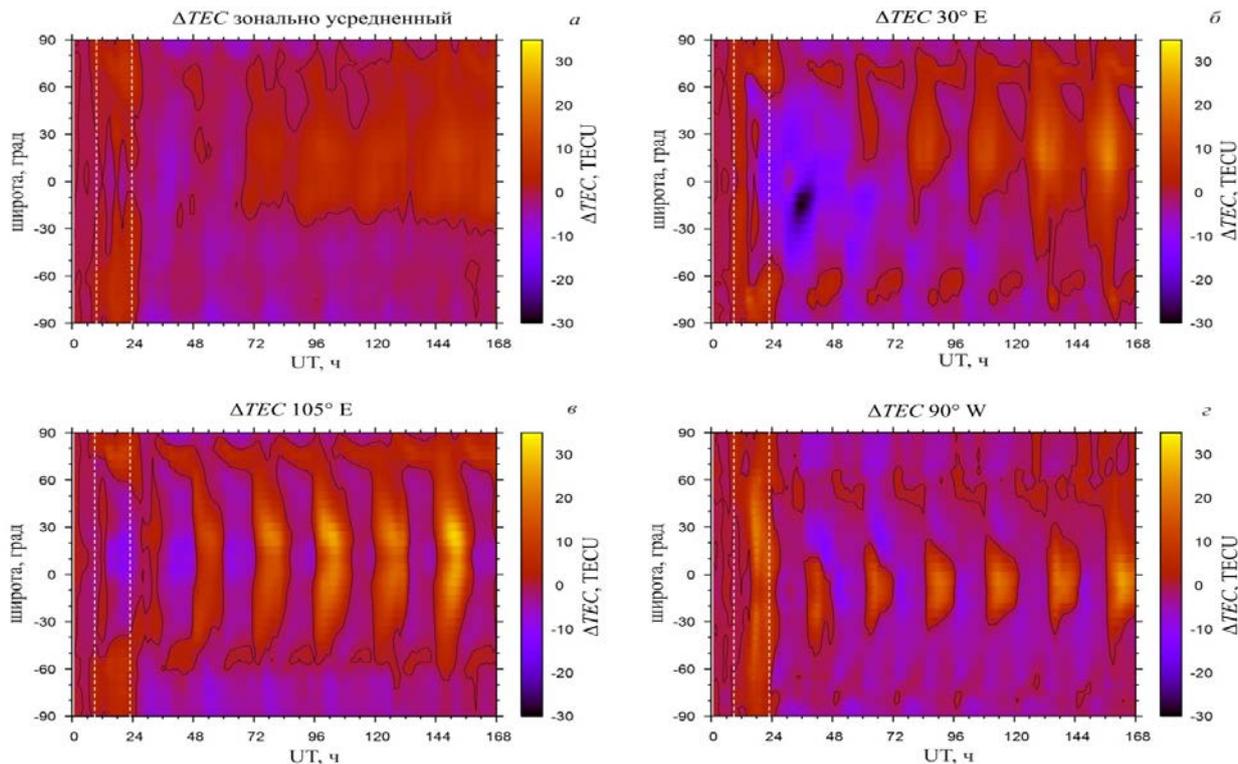


Рис. 2. Широтно-временные вариации возмущений  $TEC$  зонально усредненных значений (а); на долготах  $30^\circ$  E (б),  $105^\circ$  E (в), и  $90^\circ$  W (з) 17–23 марта 2015 г. Ноль часов соответствуют 00 UT 17 марта. Черные линии — изолинии нулевых возмущений  $TEC$ ; штриховыми линиями показана основная фаза бури

20 марта на всех широтах от экватора до полюса также формируются положительные возмущения  $TEC$ , усиливающиеся день ото дня. Анализ возмущений  $TEC$  на разных долготах показывает как их сходство (положительные возмущения в главную фазу бури, отрицательные возмущения на следующий день, появление дневных положительных и ночных отрицательных эффектов на всей продолжительной фазе восстановления геомагнитной бури), так и различия (разная широтная структура возмущений  $TEC$  в главную фазу бури, широтная протяженность и величины положительных и отрицательных возмущений  $TEC$  на фазе восстановления). Важно отметить, что наибольшие и наиболее протяженные по широте положительные возмущения  $TEC$  на фазе восстановления формируются на долготах  $30^\circ$  E и  $105^\circ$  E. На долготе  $90^\circ$  W эти возмущения сконцентрированы в экваториальной области. При этом на долготах  $105^\circ$  E и  $90^\circ$  W эти возмущения симметричны относительно экватора, а для долготы  $30^\circ$  E формируется межполушарная асимметрия со смещением положительных возмущений в Северное полушарие. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выявленные ранее эффекты последствия геомагнитных бурь [Klimenko et al., 2017; Ратовский и др., 2018; Ratovsky et al., 2020] проявляются на всех долготах, но с различной степенью интенсивности и широтным охватом. При этом наибольшие интенсивность и охват эффекта последствия имеет место в Восточно-Сибирском секторе, наименьшая интенсивность — в Американском. Впервые выявлена дол-

готная зависимость эффекта последствия геомагнитной бури и отмечается присутствие эффектов последствия для всех моментов UT в зонально-усредненных возмущениях  $TEC$ . Важным результатом является также присутствие межполушарной асимметрии эффекта последствия, который проявляется в основном в Северном полушарии.

На рис. 3 показаны в координатах UT — широта карты корреляций между  $AE$ , значениями возмущений  $TEC$  для долгот  $30^\circ$  E,  $105^\circ$  E,  $90^\circ$  W и зонально усредненными возмущениями. Можно отметить, что для всех рассматриваемых карт коэффициент корреляции имеет довольно высокие положительные значения (от 0.65 до 0.9) в высоких широтах в период с 12 до 24 UT. При этом значения корреляции больше в Южном полушарии, чем в Северном. Такие же высокие значения антикорреляции (от  $-0.4$  до  $-0.8$ ) формируются в экваториальной зоне в том же временном интервале. Области антикорреляции формируются в период с 09 до 12 UT на всех рассматриваемых долготах для всех широт. С 00 до 04 UT видна положительная корреляция для зонально усредненных  $TEC$  и для возмущений на долготе  $105^\circ$  E. В этот же период можно отметить отрицательную корреляцию между  $AE$  и возмущениями  $TEC$  для  $30^\circ$  E и  $90^\circ$  W на средних и низких широтах. Примерно с 06 до 09 UT, картина меняется на противоположную, т. е. для зонально усредненных  $TEC$  и на  $105^\circ$  E наблюдается отрицательная корреляция на средних и низких широтах, а для долгот  $30^\circ$  E и  $90^\circ$  W — положительная корреляция.

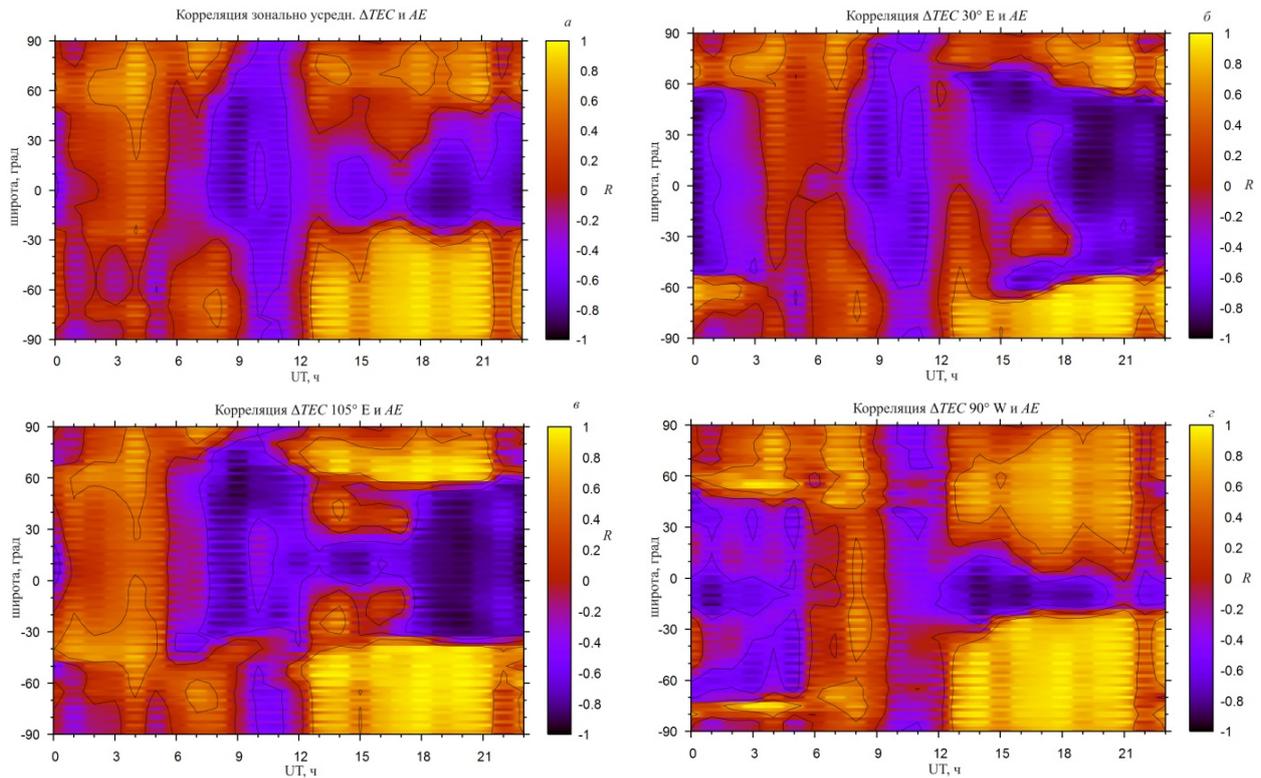


Рис. 3. Карты в координатах широта — UT коэффициента корреляции между вариациями  $AE$  для заданного часа и зонально усредненными значениями возмущений  $TEC$  (а); возмущений на долготах  $30^\circ E$  (б),  $105^\circ E$  (в), и  $90^\circ W$  (г) для заданной широты и часа UT 17–23 марта 2015 г.

Сравнивая рис. 1 и 3, можно отметить наличие некоторой зависимости  $R$  от суточных вариаций  $AE$  в первый и второй дни бури. Например, в начале бури можно заметить небольшой рост  $AE$  с 50 до 700 нТл, которому соответствуют невысокие значения коэффициента корреляции ( $\sim 0.2$ ) в период с 06 до 09 UT. При этом для долготы  $105^\circ E$  и для зонально усредненных значений положительная корреляция в указанный период сосредоточена в высоких широтах. Далее следует спад  $AE$  до 150 нТл (09–12 UT), которому соответствуют области антикорреляции возмущений  $TEC$  и  $AE$  (от  $-0.4$  до  $-0.8$ ). Резкому росту  $AE$  в главную фазу бури соответствует появление больших положительных значений корреляции в высоких широтах и антикорреляции в экваториальной зоне (12–24 UT). Для наглядности на рис. 4 показан пример вариаций день ото дня  $AE$  и возмущений  $TEC$  для широт и моментов времени со значением коэффициента корреляции до 0.9 (18 UT на  $60^\circ S$ ), со значением антикорреляции до  $-0.8$  (20 UT на экваторе) и с различными значениями коэффициента корреляции на разных долготах (01 UT на  $30^\circ N$ ). Видно, что на субавроральных широтах в первый день бури в 18 UT (почти на всех долготах) формируются максимумы положительных возмущений  $TEC$ , соответствующие максимумам  $AE$ . С уменьшением  $AE$  возмущения  $TEC$  становятся отрицательными, что связано с опустошением плазменных трубок во время главной фазы геомагнитной бури. Далее локальному максимуму  $AE$  на четвертые сутки соответствуют локальные максимумы возмущений  $TEC$  на субавроральных широтах. Про-

тивоположное поведение возмущений  $TEC$  и  $AE$  примерно в это же время (20 UT) наблюдается на экваторе. Минимальные возмущения  $TEC$  (почти на всех долготах отрицательные) формируются на экваторе в первый и второй дни в период наибольших значений  $AE$ . С уменьшением  $AE$  возмущения  $TEC$  становятся положительными, что на некоторых долготах приводит к формированию положительного эффекта последствия. В 01 UT на средних широтах связь возмущений  $TEC$  и  $AE$  практически отсутствует.

Были построены также карты в координатах широта — UT зависимостей коэффициента корреляции на долготе  $30^\circ E$  (в качестве примера) между возмущениями  $n(N_2)$ ,  $n(O)$ ,  $E_{\text{зон}}$ ,  $V_{\text{лет}}$ ,  $T_e$  и вариациями  $AE$  (рис. 5). Для наглядного сравнения карта корреляций возмущений  $TEC$  была продублирована на рис. 5. На карте корреляции между возмущениями  $n(N_2)$  и  $AE$  наблюдается положительная корреляция перед началом бури в период первого пика (07–09 UT) (см. рис. 1), а также спад корреляции (с 0.8 до 0.2), соответствующий спаду  $AE$  (в  $\sim 12$  UT) в первый и второй дни бури. В остальное время с 15 до 21 UT наблюдается высокая положительная корреляция, соответствующая высоким значениям  $AE$  в рассматриваемые моменты UT в первый и второй дни бури.

Попытка связать корреляцию возмущений  $TEC$  и  $AE$  с корреляциями возмущений других параметров и  $AE$  выявило следующие особенности. Наблюдается хорошая корреляция  $\Delta n(N_2)$  с  $AE$  на интервалах больших значений  $AE$  (начиная с  $\sim 09$  UT, основная фаза бури). Соответственно на широтах положительной корреляции  $\Delta TEC$  и  $AE$  наблюдается согласован-

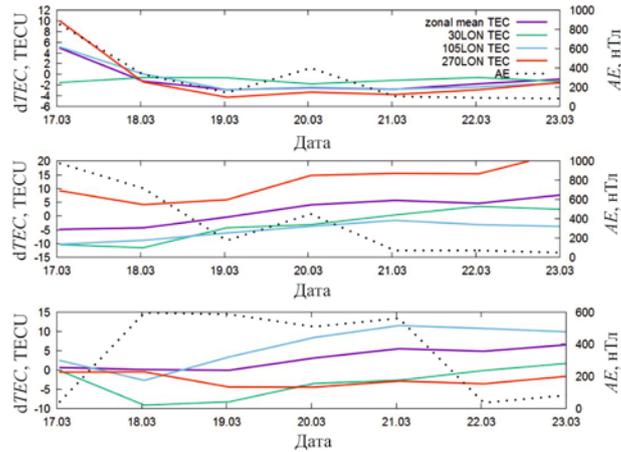


Рис. 4. Вариации день ото дня значений  $AE$ -индекса геомагнитной активности и возмущений  $TEC$  на долготах  $30^\circ E$ ,  $105^\circ E$ ,  $270^\circ E$  и их зонально усредненные значения. 1 — графики для  $60^\circ S$  в 18 UT, 2 — для экваториальной зоны в 20 UT, 3 — для  $30^\circ N$  в 01 UT

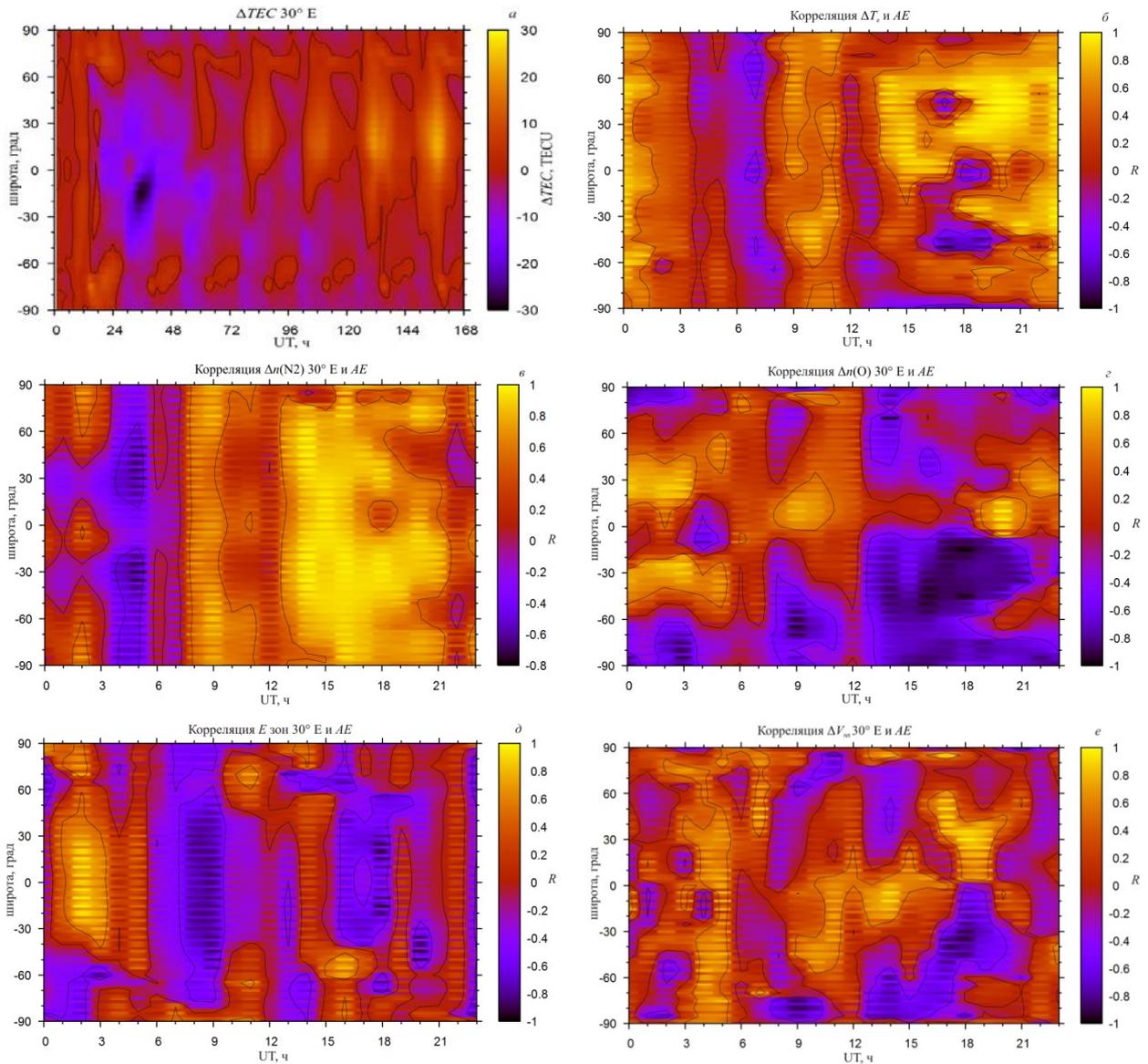


Рис. 5. Карты в координатах широта — UT зависимости коэффициента корреляции между  $AE$  и возмущениями параметров системы термосфера — ионосфера на долготе  $30^\circ E$ :  $TEC$  (а), электронной температуры (б), концентрации азота (в), концентрации кислорода (г), зонального электрического поля (д), меридионального термосферного ветра (е) 17–23 марта 2015 г.

ное поведение  $R_{\Delta TEC}$  и  $R_{\Delta n(N_2)}$ , а на широтах отрицательной корреляции  $\Delta TEC$  и  $AE$  наблюдается противоположное поведение  $R_{\Delta TEC}$  и  $R_{\Delta n(N_2)}$ . Картина корреляции  $\Delta n(O)$  с  $AE$  довольно сложная. Можно выделить область положительной корреляции (вблизи экватора), область отрицательной корреляции (в Южном полушарии на средних и низких широтах) и пятна положительной корреляции до начала бури на средних широтах. Сопоставляя  $R_{\Delta n(O)}$  и  $R_{\Delta TEC}$ , можно отметить противоположное поведение вблизи экватора, как и в случае  $R_{\Delta TEC}$  и  $R_{\Delta n(N_2)}$ . Корреляции  $\Delta E_{зон}$  и  $\Delta V_{вет}$  с  $AE$  довольно сложные. По-видимому, ключевую роль играет то, что возмущения электрического поля и термосферного ветра являются существенными лишь в первые сутки геомагнитной бури.

Таким образом можно сделать следующие заключения.

1. В некоторых пространственно-временных областях присутствует физически объяснимое противоположное поведение корреляций возмущений  $n(N_2)$  и  $TEC$ . В период 03–06 UT формируются положительные  $R_{\Delta n(N_2)}$  и отрицательные  $R_{\Delta TEC}$ , в период 09–12 UT — отрицательные  $R_{\Delta n(N_2)}$  и положительные  $R_{\Delta TEC}$ , в период 13–24 UT на средних и низких широтах формируются области положительных  $R_{\Delta n(N_2)}$  и отрицательных  $R_{\Delta TEC}$ .

2. Можно выявить некоторое сходство  $R_{\Delta n(O)}$  и  $R_{\Delta TEC}$  на средних широтах в освещенное время (06–19 UT).

3. Отсутствует какая-либо связь между  $R_{\Delta E_{зон}}$ ,  $R_{\Delta V_{вет}}$  и  $R_{\Delta TEC}$ . Согласно результатам корреляционного анализа, связь  $TEC$  и  $AE$  объясняется важной ролью возмущений состава нейтральной термосферы на протяжении всего рассматриваемого периода 17–23 марта. При этом роль возмущений электрического поля и термосферного ветра в формировании возмущений  $TEC$  является существенной лишь в первые сутки геомагнитной бури [Dmitriev et al., 2017; Ratovsky et al., 2020]. Важно отметить, что областям высоких значений  $R_{\Delta TEC}$  в высоких широтах в 12–24 UT соответствуют высокие  $R_{\Delta n(N_2)}$  и отрицательные  $R_{\Delta n(O)}$ . Это говорит о том, что возмущения состава не являются ключевым фактором в возмущениях  $TEC$  в высоких широтах. Высокоширотную положительную корреляцию  $TEC$  можно объяснять поведением  $T_e$ , имеющим схожие структуры на этих широтах в 14–23 UT.

## ВЫВОДЫ

Анализ связи с возмущениями  $TEC$  вариаций  $AE$  и параметров системы термосфера — ионосфера во время геомагнитной бури 17–23 марта 2015 г. позволил получить следующие результаты.

1. Показано, что зонально усредненные возмущения  $TEC$  указывают на формирование положительного эффекта последствия, наблюдающегося в дневные часы и расширяющегося от экватора к полюсам. Выявленные ранее эффекты последствия геомагнитных бурь [Klimenko et al., 2017; Ратовский и др., 2018; Ratovsky et al., 2020] проявляются на всех долготах, но с различной степенью интенсивности и широтным охватом.

2. Отмечается наличие некоторой зависимости найденного коэффициента корреляции между  $TEC$  и  $AE$  от суточных вариаций  $AE$  в первый и второй дни бури. Наибольшие значения корреляции и антикорреляции  $\Delta TEC$  с  $AE$  наблюдаются для интервала наибольших значений  $AE$ .

3. Показано, что возмущения состава нейтральной термосферы не являются ключевым фактором в возмущениях  $TEC$  в высоких широтах. Высокоширотную положительную корреляцию  $TEC$  с  $AE$  можно объяснить поведением корреляции  $T_e$  с  $AE$ , имеющим схожие структуры на этих широтах в 14–23 UT. Рост (падение)  $AE$  означает рост (падение)  $T_e$  в высоких широтах за счет усиления (ослабления) электрического поля магнитосферной конвекции. Следует отметить, что в высоких широтах положительные эффекты возрастания  $T_e$  преобладают над отрицательными эффектами возрастания  $n(N_2)$ , а в экваториальной области имеет место обратная картина. Наибольшая антикорреляция между  $\Delta TEC$  и  $AE$  наблюдается в экваториальной области. Это объясняется поведением  $\Delta n(N_2)$  в экваториальной зоне, которое хорошо коррелирует с  $AE$ .

Было выявлено некоторое сходство корреляций возмущений  $n(O)$  и  $TEC$  на средних широтах в освещенное время. Важно отметить, что отсутствует какая-либо связь между корреляциями возмущений зонального электрического поля, меридионального термосферного ветра и  $TEC$ . Согласно результатам корреляционного анализа, связь  $TEC$  и  $AE$  объясняется важной ролью возмущений состава нейтральной термосферы на протяжении всего рассматриваемого периода 17–23 марта, тогда как роль возмущений электрического поля и термосферного ветра в формировании возмущений  $TEC$  является ключевой лишь в первые сутки геомагнитной бури.

Данные по космической погоде были предоставлены NASA/GSFC's Space Physics Data Facility's OMNIWeb service [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-17-00208 в части проведения исследований с использованием модели верхней атмосферы и Минобрнауки России — в части анализа данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Депенев В.Х., Депенева А.Х. Зависимость медианы критической частоты F2-слоя на средних широтах от геомагнитной активности. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 74–81. DOI: [10.12737/szf-34201707](https://doi.org/10.12737/szf-34201707).

Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Депенев В.Х., Депенева А.Х. Связь среднего за месяц ионосферного индекса  $T$  с индексами солнечной и геомагнитной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61, № 6. С. 735–740. DOI: [10.31857/S0016794021060043](https://doi.org/10.31857/S0016794021060043).

Золотухина Н.А., Полев Н.М., Михалев А.В. и др. Особенности эмиссий 630.0 и 557.7 нм в области главного ионосферного провала: 17 марта 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 57–71. DOI: [10.12737/szf-73202105](https://doi.org/10.12737/szf-73202105).

Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта

2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 54–61. DOI: [10.12737/szf-44201806](https://doi.org/10.12737/szf-44201806).

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. DOI: [10.12737/szf-44201804](https://doi.org/10.12737/szf-44201804).

Шпынев Б. Г., Хабитуев Д.С., Черниговская М. А. Исследование причин долготных неоднородностей ионосферных возмущений в Северном полушарии во время геомагнитных бурь. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 5. С. 241–250. DOI: [10.21046/2070-7401-2018-15-5-241-250](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-241-250).

Ягодкина О.И., Панченко В.А., Воробьев В.Г. и др. Влияние магнитной активности и давления солнечного ветра на среднеширотную ионосферу во время магнитной бури 22–23 июня 2015 г. *Proc. XLIV Annual Seminar. "Physics of Auroral Phenomena"*. Apatity, 2021. P. 163–167. DOI: [10.51981/2588-0039.2021.44.038](https://doi.org/10.51981/2588-0039.2021.44.038).

Balan N., Alleyne H., Otsuka Y., et al. Relative effects of electric field and neutral wind on positive ionospheric storms. *Earth, Planets and Space*. 2009. Vol. 61, no. 4. P. 439–445.

Balan N., Otsuka Y., Nishioka M., et al. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118, iss. 5. P. 2660–2669. DOI: [10.1002/jgra.50275](https://doi.org/10.1002/jgra.50275).

Buonsanto M.J. Ionospheric storms: A review. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 563–601. DOI: [10.1023/A:1005107532631](https://doi.org/10.1023/A:1005107532631).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 4204–4214.

Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index *AE* and its universal time variations. *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71. P. 785–803.

Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., et al. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, iss. 2. P. 2398–2423. DOI: [10.1002/2016JA023260](https://doi.org/10.1002/2016JA023260).

Feshchenko E.Yu., Maltsev Yu.P. Relations of the polar cap voltage to the geophysical activity. *Proc. 26 Annual Seminar. "Physics of Auroral Phenomena"*. Apatity, 2003. P. 59–61.

Fuller-Rowell T., Codrescu M., Maruyama N., et al. Observed and modeled thermosphere and ionosphere response to superstorms. *Radio Sci.* 2007. Vol. 42, iss. 4. DOI: [10.1029/2005RS003392](https://doi.org/10.1029/2005RS003392).

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1994. Vol. 99, iss. A4. P. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).

Huba J.D., Maute A., Crowley G. SAMI3\_ICON: Model of the ionosphere plasmasphere system. *Space Sci. Rev.* 2017. Vol. 212. P. 731–742. DOI: [10.1007/s11214-017-0415-z](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0415-z).

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. Vol. 46, iss. 3. RS0D03. DOI: [10.1029/2010RS004590](https://doi.org/10.1029/2010RS004590).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., et al. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the  $f_oF_2$  and *TEC* disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011. *Ann. Geophys.* 2017. Vol. 35. P. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).

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. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 180. P. 78–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).

Lu G., Goncharenko L.P., Richmond A.D., et al. A dayside ionospheric positive storm phase driven by neutral winds. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, iss. A8. A08304. DOI: [10.1029/2007JA012895](https://doi.org/10.1029/2007JA012895).

Mayr H.G., Volland H. Magnetic storm characteristics of the thermosphere. *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78, no. 13. P. 2251–2264.

Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006. Vol. 44, iss. 4. RG4001. DOI: [10.1029/2005RG000193](https://doi.org/10.1029/2005RG000193).

Namgaladze A.A., Förster M., Yurik R.Y. Analysis of the positive ionospheric response to a moderate geomagnetic storm using a global numerical model. *Ann. Geophys.* 2000. Vol. 18. P. 461–477. DOI: [10.1007/s00585-000-0461-8](https://doi.org/10.1007/s00585-000-0461-8).

Pawlowski D.J., Ridley A.J., Kim I., Bernstein D.S. Global model comparison with Millstone Hill during September 2005. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, iss. A1. A01312. DOI: [10.1029/2007JA012390](https://doi.org/10.1029/2007JA012390).

Pirog O.M., Polekh N.M., Tashchilinet A.V., et al. Response of ionosphere to the great geomagnetic storm of September 1998: Observation and modeling. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 37, iss. 5. P. 1081–1087. DOI: [10.1016/j.asr.2006.02.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.005).

Prölss G.W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. CRC Press, 1995. Vol. 2. P. 195–248.

Prölss G.W. Ionospheric storms at mid-Latitude: A short review. *Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances*. Washington: American Geophys. Union, 2013. (Geophys. Monograph Ser., 181). DOI: [10.1029/181GM03](https://doi.org/10.1029/181GM03).

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. Vol. 11, iss. 12, 1308. DOI: [10.3390/atmos11121308](https://doi.org/10.3390/atmos11121308).

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. Vol. 99, no. A11. P. 21341–21352.

Sugiura M. Hourly values of equatorial *Dst* for the IGY. *Annals of the International Geophysical Year*. New York: Elsevier, 1964. Vol. 35. P. 945–948.

Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C., et al. *TEC* evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118, iss. 7. P. 4672–4695. DOI: [10.1002/jgra.50439](https://doi.org/10.1002/jgra.50439).

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Empirical model of auroral precipitation power during substorms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70. P. 654–662.

Zhang S.-R., Zhang Y., Wang W., Verkhoglyadova O.P. Geospace system responses to the St. Patrick's Day storms in 2013 and 2015. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, iss. 6. P. 6901–6906. DOI: [10.1002/2017JA024232](https://doi.org/10.1002/2017JA024232).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

#### Как цитировать эту статью:

Белюченко К.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г. Связь возмущений полного электронного содержания с *AE*-индексом геомагнитной активности во время геомагнитной бури в марте 2015 г. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 41–48. DOI: [10.12737/szf-83202206](https://doi.org/10.12737/szf-83202206).