

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.007

ЭФФЕКТЫ БУРИ 4 НОЯБРЯ 2021 ГОДА В ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ ИОНОСФЕРЫ

И.И. Ефишов^{1*}, И.И. Шагимурагов¹, М.В. Клименко¹,
Г.А. Якимова¹, Н.Ю. Тепеницина¹, М.В. Филатов²

¹Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

²Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия

*E-mail: efishov@hotmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты мониторинга вариаций Полного Электронного Содержания (ПЭС (ТЕС)) во время геомагнитной бури 4 ноября 2021 г. в европейском секторе. Для анализа привлекались карты ТЕС сформированные в широтном диапазоне 30-80°N; для долгот 10°W-40°E. На активной стадии бури развивалась положительная фаза, максимальный эффект наблюдался в дневное время. Характерной особенностью развития бури явилось возмущение, которое проявилось в виде шлейфа повышенной ионизации, простирающегося в направлении северо-запад. Предполагается, что это есть проявление эффекта SED (storm enhanced density). Повышение достигало широт 70-75°N. На картах ТЕС эффект наиболее ярко проявился во временном интервале 08-10 UT.

1. Введение

Несколько характерных крупномасштабных неоднородностей имеют место в полярной и субавроральной ионосфере во время спокойных и возмущённых условий. К ним можно отнести главный ионосферный провал (MIT-main ionospheric trough), буревое увеличение ионизации (SED-storm enhanced density), язык ионизации (TOI-tongue of ionization) и пятна повышенной ионизации (polar patches). Сильные градиенты на краях этих структур приводят к генерации неоднородностей, с которыми связаны скитилляции/флуктуации навигационных сигналов. Флуктуации GPS/ГЛОННАС сигналов приводят к ухудшению, нарушению навигации и связи в высоких широтах [Jin et al., 2014; Cherniak et al., 2015; Prikryl et al., 2015; Shagimuratov et al., 2021]. Особенно это критично в области проявления SED. Структура TOI показывают зависимость от UT, сезона, долготы. Внутри TOI ионизация может в 2-10 раз превышать фоновую/ночную ионизацию в полярной шапке. Структура SED проявляется как узкая по широте область повышенной ионизации, локализованная подобно струе (шельфу), которая транспортируется в направлении полюса от источника дополнительной ионизации со средних широт [Coster et al., 2007; Foster, 1993] и в дальнейшем эволюционирует в язык ионизации.

При конвенции SED/TOI структуры через полярную шапку TOI может фрагментироваться на дискретные полярные патчи. Несколько механизмов предложено для формирования SED/TOI структуры [Liu et al., 2015; Klimenko et al., 2019; Pokhotelov et al., 2021]. Структура SED довольно ярко проявляется в ТЕС вариациях. Как показано в работе Foster and Rideout (2005), во время супербури ноября 2003 г. наблюдалось увеличение ТЕС внутри SED более чем на порядок по сравнению с фоном. На основе 3D томографической реконструкции ТЕС измерений для американского сектора во время бури 17 марта 2013 г. выявлена высотная структура SED. Показано, что наибольшее увеличение ионизации наблюдается выше максимума F2 слоя [Zhai et al., 2020]. На основе наблюдений и моделирования показано, что схожий вывод можно сделать про вертикальную структуру TOI во время бури 17 марта 2015 г. [Klimenko et al., 2019]. Согласно результатам модельных расчетов на высотах плазмосферы область повышенных значений электронной концентрации занимает почти всю полярную шапку, что связано с уменьшением скорости рекомбинации и увеличением электронной температуры с увеличением высоты. Несмотря на существующую взаимосвязь Liu et al. (2015, 2016) указали на то, что SED и TOI являются различными структурами, появляющимися на разных широтах с разными механизмами формирования и модификации.

Благоприятные условия для формирования SED/TOI складываются в Североамериканском секторе. Большинство ранее выполненных исследований касались именно этого сектора. Позже структуры SED/TOI обнаружены в других долготных секторах. В частности, в Европейском секторе во время бури 11 сентября 2005 г. [Yizengaw et al., 2006], в Европейском и Российском секторах во время бури 1-2 октября 2001 г. и 18 апреля 2002 г. [Coster et al., 2007], над Гренландией 10-12 октября 2010 г. [Shan et al., 2022]. Большинство исследований, касающихся анализа SED/TOI, сфокусировано на проявление этих структур во время сильных геомагнитных возмущений. В данной работе представлены результаты наблюдений пространственно-временного поведения ТЕС с проявлением SED для умеренной бури 4 ноября 2021 г. в европейском регионе

и проведено сравнение основных характеристик этого образования с другими бурями и другими долготными секторами.

Геомагнитное развитие бури представлено на рис. 1. Внезапное начало бури (SSC) было зарегистрировано в ~19:50 UT 3 ноября 2021 г, затем последовало падение индекса *SYM-H* до значения -110 nT в 08:25 UT и -120 nT в 12:40 UT 4 ноября 2021 г. После 16:30 UT последовала фаза восстановления. Индекс геомагнитной активности *K_p* достигал значения 8 в 09-12 UT 4 ноября. При получении карт ТЕС использовались GPS наблюдения Европейской сети станций (EPN). Также привлекались IONEX данные с 15 мин. временным разрешением.

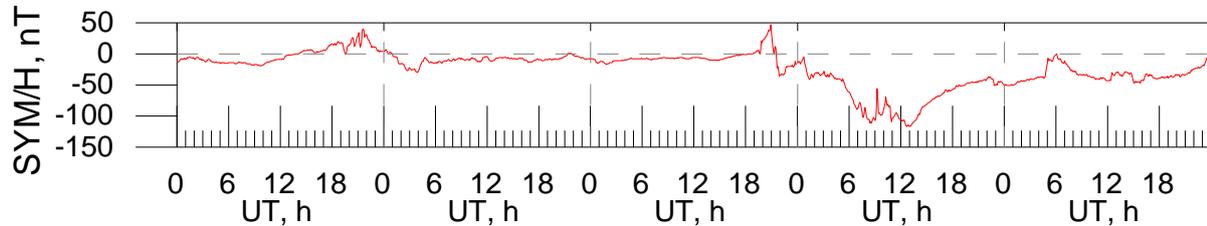


Рисунок 1. Индекс SYM-H за 1-5 ноября 2021 года.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены карты ТЕС для Европейского региона в диапазоне $30-80^{\circ}\text{N}$; для долгот $10^{\circ}\text{W}-35^{\circ}\text{E}$ с одночасовым интервалом. Плотная сеть GPS/ГЛОНАСС станций в Европейском регионе обеспечивает высокое пространственно-временное разрешение карт ТЕС. При построении карт мы использовали 70-80 станций. После начала бури повышение ТЕС наблюдается на широтах выше 60°N 3 ноября после 21 UT. Затем сформировался среднеширотный провал, который четко наблюдался в ночные часы, опускаясь до широт меньше 60°N . При этом на широтах $\sim 65^{\circ}\text{N}$ во время бури четко проявляется высокоширотная стенка провала в период с 22 UT 3 ноября до 03 UT 4 ноября.

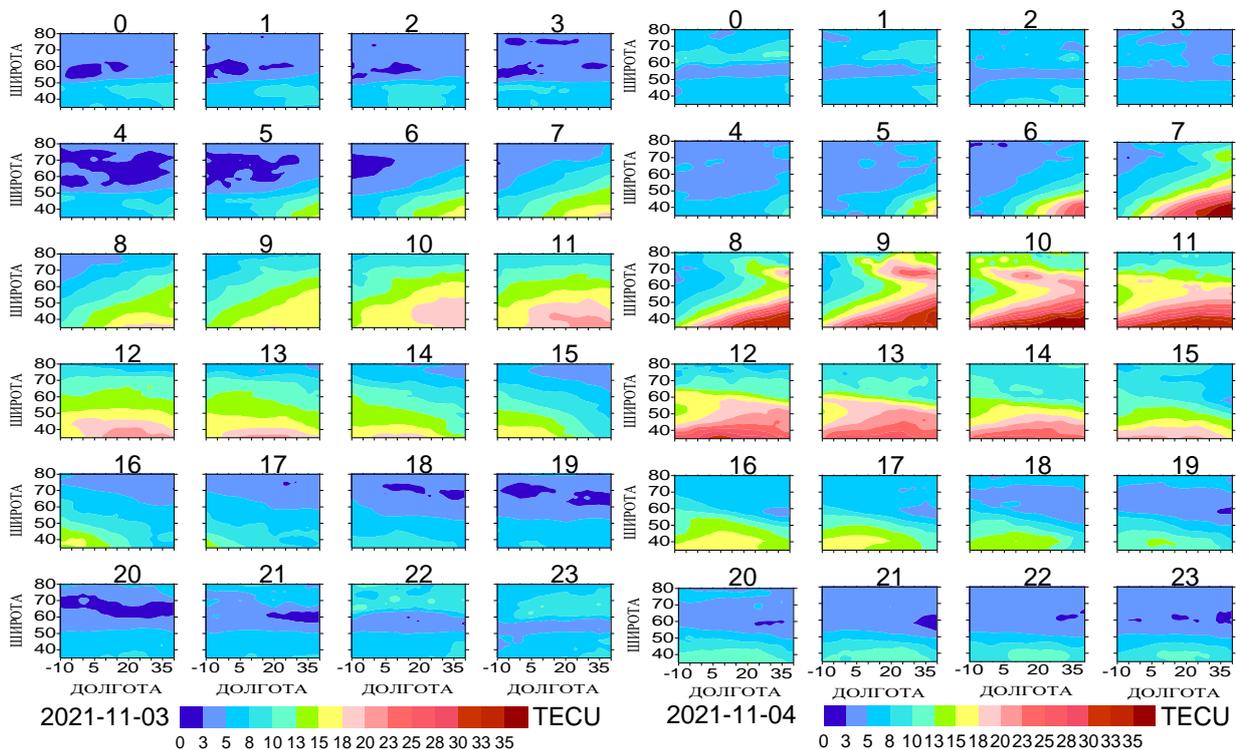


Рисунок 2. Карты ТЕС над Европой для 3 ноября (спокойный день) и 4 ноября 2021 г. (возмущенный день).

Положительная фаза бури наблюдается 4 ноября на фоне спокойного дня 3 ноября. Наиболее ярко положительное возмущение проявилось в дневное время. Характерной особенностью пространственного поведения ТЕС явилось положительное возмущение в виде узкой области (струи, шлейфа), простирающееся в северо-западном направлении, наблюдавшееся с 07 до 11 UT. Максимальный эффект пришелся на 09-10 UT

(11-12 LT на долготе 30°), в районе местного полудня. Широтный размер области составляет около $3-5^\circ$ в диапазоне $62-67^\circ$ географической широты. Предположительно эффект соответствует проявлению SED структуры. В работе [Coster et al., 2007] представлены примеры развития SED в Российском и Европейском регионах и затем прослежено их проявление в Северной Америке. Над Восточной Сибирью и Европой SED наблюдался около местного полудня, а к Америке структура сдвигалась к западу. В Европе структура SED наблюдалась в течение 15-20 часов в диапазоне $61-63^\circ$ инвариантной широты. Максимальная интенсивность эффекта приходилась на Северную Америку. В нашем случае SED наблюдался в течение 6-8 часов, причем, важно отметить, приблизительно на тех же широтах. Для рассматриваемого нами случая SED эффект приходится на стадию активной фазы бури после 09 UT, при этом K_p достигал своего максимального значения: 7-8. Заметим, что для возмущения 11 сентября 2005 г. SED структура регистрировалась на стадии восстановительной фазы бури, при этом K_p индекс достигал значения 7.

На картах TEC след SED ярко проявляется в интервале 09-10 UT. на широтах $60-70^\circ\text{N}$. Детальное проявления SED можно видеть на суточной вариации TEC по станции TRO1, которая находилась в центре струи максимума повышенной электронной концентрации (рис. 3).

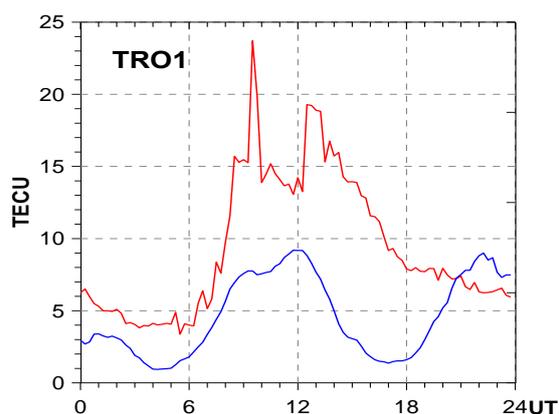


Рисунок 3. Суточная вариация TEC на станции TRO1 для 3 (синяя) и 4 (красная) ноября 2021 г.

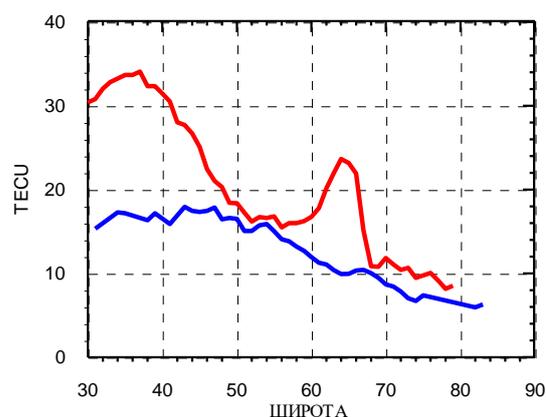


Рисунок 4. Широтный профиль на долготе 20°E (10 UT) для 3 (синяя) и 4 (красная) ноября 2021 г.

Главное повышение TEC в суточном ходе для 4 ноября, как и на картах, приходится на 09-10 UT. Максимальное значение приходилось на 09:20 UT и достигало величины около 23 TECU, тогда как 3 ноября в это время значение TEC составляло около 8 TECU, т.е. буревое повышению превышало в 3 раза спокойный ход. В суточном ходе TEC для 3 ноября наблюдается повышение в вечернее/ночное время сравнимое с дневным уровнем. Это повышение соответствует внезапному началу бури (19:50 UT). В целом, по сравнению со спокойным днем, 4 ноября наблюдалось положительное возмущение TEC.

На рис. 4 представлен широтный профиль TEC для 10 UT на долготе 20°E по данным базы Мадригал. Для сравнения представлен и профиль для 3 ноября. Структура SED шельфа проявляется на широтах около 62° в виде горба резкого повышения TEC на фоне его плавного изменения с широтой. Ширина SED составляет 7-8 градусов. Положение и размеры SED согласуются с полученными ранее [Coster et al., 2007] для Европейского сектора.

Заключение

Анализ карт TEC обеспечил получение детальной картины пространственно-временного развития ионосферных возмущений во время умеренной, по интенсивности, бури 4 ноября 2021 года на широтах выше 30°N для Европейского региона. На стадии активной фазы бури наблюдалась положительное возмущение, которое наиболее ярко проявилось в дневные часы. На высоких широтах повышение TEC проявилось в виде узкой по широте полосы (шлейфа), простирающейся в северо-западном направлении до широт около 75°N . Максимум эффекта пришелся около полудня, на географические широты $61-68^\circ\text{N}$ и был определен как SED (Storm enhanced density). Ранее подобная структура регистрировалась на разных долготах в TEC вариациях [Coster et al., 2007]. Амплитуда эффекта существенно меньше, чем регистрировалась это в североамериканском секторе для очень сильных магнитных бурь. Относительно малая амплитуда обусловлена в большей части долготной зависимостью эффекта и умеренной интенсивности рассматриваемой нами магнитной бури.

Литература

- Cherniak Yi., Zakharenkova I. (2015). Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: A case study of 17 March 2015 geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 151. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0316-x>
- Coster A.J., Colerico M.J., Foster J.C., et al. (2007). Longitude sector comparisons of storm enhanced density. *Geophysical Research Letters*, 34, L18105. doi:10.1029/2007gl030682
- Foster J.C. (1993). Storm Time Plasma Transport at Middle and High Latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 98(A2), 1675-1689.
- Foster J.C. and Rideout W. (2005). Midlatitude TEC enhancements during the October 2003 superstorm. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12S04. doi:10.1029/2004GL021719
- Jin Y., Moen I., Oksavik K., et al. (2017). GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches. *J. Space Weather Space Clim.*, A23. doi:10.1051/swsc/2017022
- Liu J., Nakamura T., Liu L., Wang W., et al. (2015). Formation of polar ionospheric tongue of ionization during minor geomagnetic disturbed conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 6860–6873. <https://doi.org/10.1002/2015JA021393>
- Liu J., Wang W., Burns A., et al. (2016). Relative importance of horizontal and vertical transports to the formation of ionospheric storm-enhanced density and polar tongue of ionization. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 8121–8133. <https://doi.org/10.1002/2016JA022882>
- Liu J., Wang W., Burns A., et al. (2016). Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA02183>
- Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., et al. (2019). Simulation and observations of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's Day storm. *SpaceWeather*, 17, 1073–1089. <https://doi.org/10.1029/2018SW002143>
- Prikryl P., Jayachandran P.T., Chadwick R., et al. (2015). Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013. *Ann Geophys.*, 33, 531–545. doi:10.5194/angeo-33-531-2015
- Pokhotelov D., Fernandez-Gomez I. and Borries C. (2021). Polar tongue of ionisation during geomagnetic superstorm. *Ann. Geophys.*, 39, 833–847. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-833-2021>
- Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V., et al. (2018). Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances. *Sun and Geosphere*. 13/1, 89-94.
- Shai C., Lu G. Yibin Yao Y., et al. (2020). Tomographic Reconstruction of SED Plume During 17 March 2013 Storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, Is. 11. <https://doi.org/10.1029/2020JA028257>
- Shan L.L., Yao Y.B., Kong J., et al. (2022). Three-dimensional reconstruction of tongue of ionization during the 11 October 2010 geomagnetic storm and evolution analysis with TIEGCM. *Space Weather*, 20, e2021SW002862. <https://doi.org/10.1029/2021SW002862>
- Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D.A. (2006). Ionospheric signatures of a plasmaspheric plume over Europe. *Jeophysical Research Letters*, 33, L17103. <https://doi.org/10.1029/2006GL026597>
- Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И., Тепеницына Н.Ю. (2021). Флуктуации полного электронного содержания и ошибки GPS позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 года. *Изв. РАН. Серия физическая*, Т. 85, № 3, 427–433. doi:10.31857/S036767652103025X