

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОСФЕРЫ И ПЛАЗМОСФЕРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

<sup>1,2</sup>М.В. Клименко, <sup>1</sup>В.В. Клименко, <sup>1</sup>И.Е. Захаренкова, <sup>3</sup>К.Г. Ратовский,  
<sup>1</sup>Н.А. Коренькова, <sup>3</sup>А.В. Подлесный

## THERMOSPHERE AND PLASMASPHERE INFLUENCE ON THE FORMATION OF IONOSPHERIC DISTURBANCES AT DIFFERENT GEOMAGNETIC STORM PHASES

<sup>1,2</sup>M.V. Klimenko, <sup>1</sup>V.V. Klimenko, <sup>1</sup>I.E. Zakharenkova, <sup>3</sup>K.G. Ratovsky, <sup>1</sup>N.A. Koren'kova, <sup>3</sup>A.V. Podlesny

В данном исследовании представлены данные спутниковых и наземных наблюдений параметров системы ионосфера-плазмосфера во время геомагнитных бурь 17–23 марта 2015 г. и 26–30 сентября 2011 г. Результаты расчетов, выполненные с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы, позволили выявить влияние процессов в термосфере и плазмосфере на динамику полного электронного содержания и электронной концентрации в максимуме F2-слоя во время геомагнитных бурь. Обсуждаются результаты исследования механизмов формирования возмущений на различных фазах геомагнитных бурь. Особое внимание обращается на ионосферные возмущения, формирующиеся на фазе восстановления геомагнитных бурь.

This study presents the satellite and ground-based observation data of the ionosphere-plasmasphere parameters during geomagnetic storms on March 17–23, 2015 and September 26–30, 2011. The Global Self-consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere allowed to reveal the main processes in the thermosphere and plasmasphere influence on the dynamics of the total electron content and F2 layer peak electron density during geomagnetic storms. The formation mechanisms of ionospheric disturbances at different phases of geomagnetic storms are discussed. The particular attention is given to the ionospheric disturbances during the recovery storm phase.

### Введение

Несмотря на несомненный прогресс в исследовании ионосферных эффектов геомагнитных бурь, до сих пор не найдены окончательные ответы на некоторые дискуссионные вопросы. К таковым относится вопрос о механизмах формирования положительной ионосферной бури в F-области ионосферы и в полном электронном содержании (ТЕС). Согласно [Prölss, 1995], положительная ионосферная буря на средних широтах в главную фазу геомагнитной бури объясняется подъемом ионосферной плазмы в область меньших скоростей химических потерь при ее переносе к экватору вдоль силовых линий геомагнитного поля за счет увлечения плазмы дополнительным меридиональным термосферным ветром, возникающим в результате нагрева термосферы в авроральной области во время геомагнитной бури. Показали [Mannucci et al., 2005], что увеличение ТЕС на средних широтах сопровождается усилением экваториальной аномалии, и предположили, что это связано с вертикальным и горизонтальным переносом плазмы. Сделали [Heelis et al., 2009] вывод о том, что расширение области магнитосферной конвекции к экватору во время сильных геомагнитных бурь приводит днем к росту ТЕС на средних и низких широтах. Как показали исследования [Balan et al., 2009], для генерации положительной ионосферной бури на средних и низких широтах в дневное время достаточно появления дополнительного термосферного ветра к экватору. В последние годы оживленная дискуссия о механизмах формирования дневных положительных ионосферных эффектов в главную фазу геомагнитной бури [Tsurutani et al., 2013] не выявила единой точки зрения по этому вопросу. Кроме этого, требуется проведение исследований механизмов формирования ионосферных возмущений на фазе восстановления геомагнитных бурь, которые активно обсуждаются в последнее время [Balan et al., 2013; Suvorova et al., 2013]. При этом следует уточ-

нить влияние изменений нейтрального состава и ионосферно-плазмосферных связей на формирование ионосферных эффектов на фазе восстановления геомагнитных бурь. В данной работе представлены данные наблюдений ионосферных эффектов геомагнитных бурь 17–23 марта 2015 г. и интерпретация поведения ионосферы во время геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 г. на основе Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [Намгаладзе и др., 1990].

### Описание рассматриваемых явлений

Рекордная по силе за последние четыре года геомагнитная буря произошла 17–19 марта 2015 г. Максимальные значения геомагнитного  $K_p$ -индекса в этот период достигали 8. Последний раз возмущения такой интенсивности наблюдались во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 г., которая была одной из сильнейших бурь за период 2007–2011 гг. На рис. 1, 2 показано поведение  $D_{st}$ -индекса геомагнитной активности 15–23 марта 2015 г. и 21–30 сентября 2011 г., соответственно. Обе бури произошли в равноденствие при среднем уровне солнечной активности, и начало самых сильных изменений геомагнитного поля в обоих случаях пришлось на ~12:00 UT.

### Данные измерений и результаты модельных расчетов

На рис. 3 показано поведение критической частоты максимума F2-слоя ионосферы,  $f_oF2$ , и полного электронного содержания, ТЕС, на ионосферных ст. Иркутск и Калининград с 17 по 23 марта 2015 г. по данным цифровых ионозондов и GPS приемников. В качестве фоновых значений ионосферных параметров выбирались суточные вариации для 15 марта 2015 г., когда геомагнитная активность была низкой. Первая буря, которая началась 17 марта в 03:00 UT, вызвала в Иркутске отрицательные возмущения  $f_oF2$  и ТЕС утром и не привела к заметным

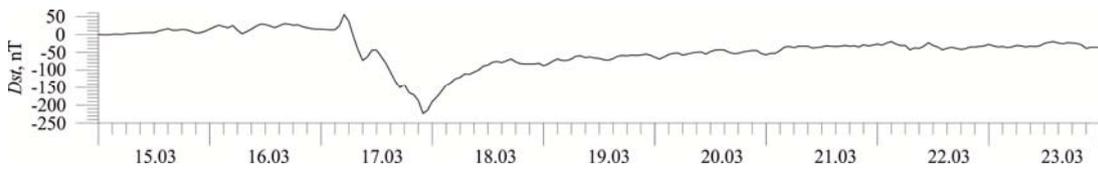


Рис. 1. Поведение  $D_{st}$ -индекса геомагнитной активности 15–23 марта 2015 г.

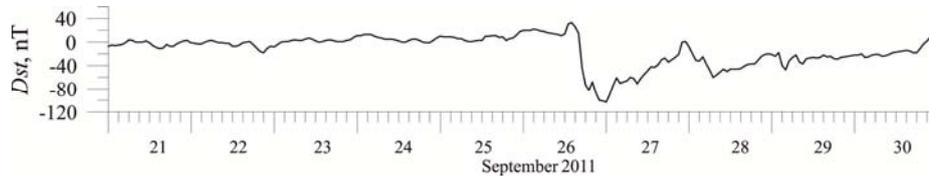


Рис. 2. Поведение  $D_{st}$ -индекса геомагнитной активности 21–30 сентября 2011 г.

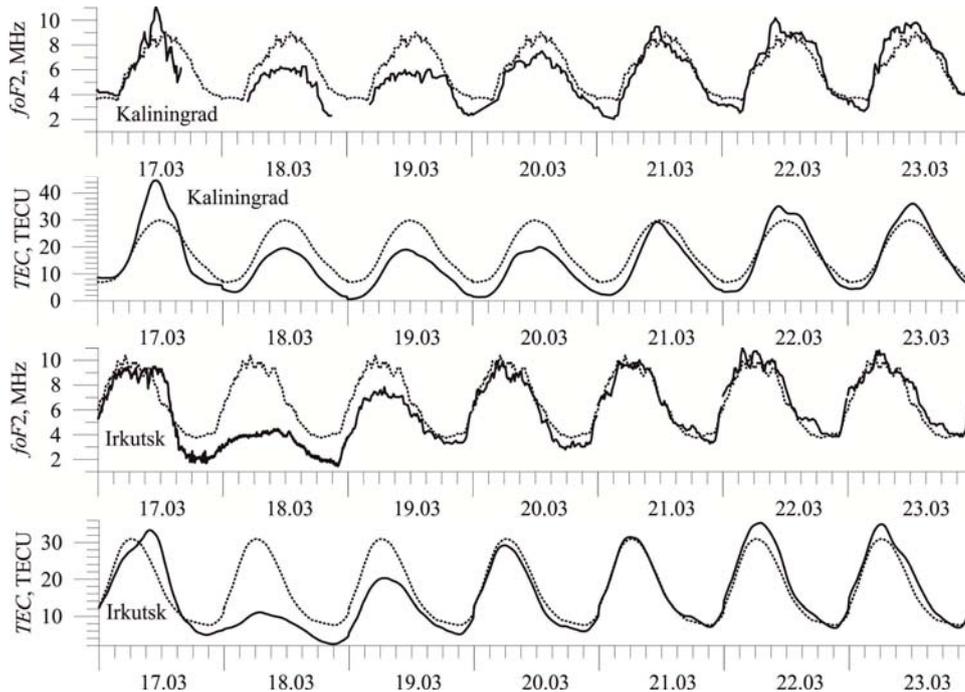


Рис. 3. Поведение  $f_oF2$  и ТЕС над Калининградом и Иркутском по данным ионозондов и GPS приемников: с 17 по 23 марта 2015 г. (сплошные линии), в спокойных геомагнитных условиях 15 марта 2015 г. (пунктир).

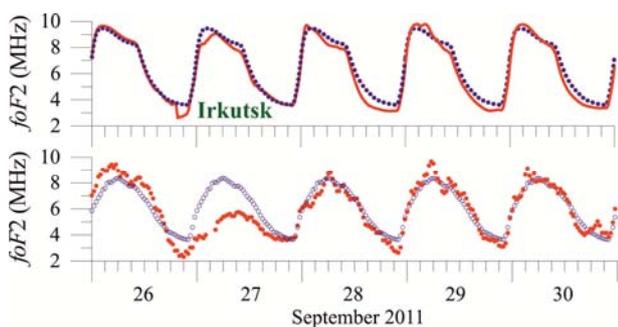


Рис. 4. Поведение  $f_oF2$  над Иркутском во время бури 26–30 сентября 2011 г. (красные кривые и кружки) и в спокойных геомагнитных условиях (синий пунктир и кружки), рассчитанное в модели ГСМ ТИП (вверху) и по данным ионозонда (внизу).

эффектам в Калининграде ночью. В свою очередь, последовавшая за ней более сильная и продолжительная геомагнитная буря с началом в 12:00 UT на начальном этапе своего развития привела к формированию положительных ионосферных возмущений в Калининграде днем и в Иркутске вечером. После этого на обеих станциях в течение более, чем трех

дней (с 15:00 UT 17 марта по 20 марта) формировались значительные отрицательные возмущения  $f_oF2$  и ТЕС, которые, по всей вероятности, главным образом, связаны с уменьшением отношения  $n(O)/n(N_2)$  вследствие разогрева термосферы в высоких широтах, приводящего как к увеличению  $n(N_2)$ , так и к уменьшению  $n(O)$  в Иркутске и Калининграде. Важной особенностью поведения ионосферы над станциями Иркутск и Калининград на фазе восстановления геомагнитной бури 21–23 марта 2015 г. является существование дневных положительных возмущений  $f_oF2$  и ТЕС. В ночное время в эти же дни над Калининградом наблюдаются отрицательные возмущения, которые практически отсутствуют над Иркутском.

На рис. 4 показано поведение  $f_oF2$  на станции Иркутск с 26 по 30 сентября 2011 г. по данным вертикального зондирования и по результатам расчетов, полученных с использованием модели ГСМ ТИП. Как и для бури в марте 2015 г., в главную фазу геомагнитной бури 26 сентября 2011 г. над Иркутском в вечернем секторе формируются положительные возмущения  $f_oF2$ , которые сменяются ночным понижением. В дневное время 27 сентября формируются

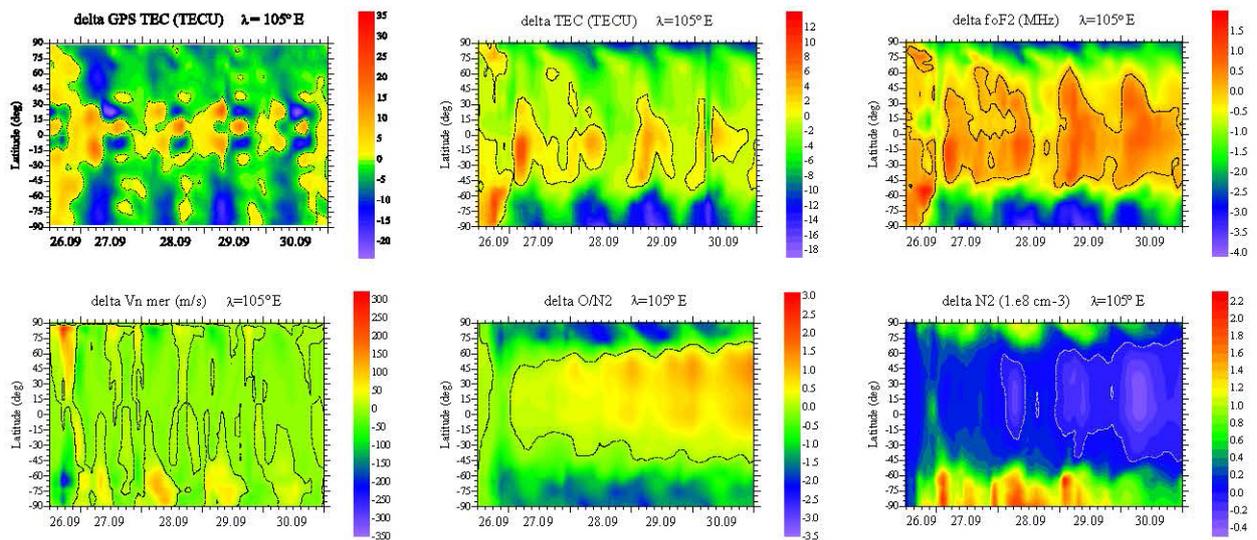


Рис. 5. Поведение возмущений GPS TEC, а также рассчитанных в модели ГСМ ТИП возмущений TEC,  $f_oF2$ , меридиональной компоненты скорости термосферного ветра,  $n(O)/n(N_2)$  и  $n(N_2)$  на высоте 300 км во время геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 г. на долготе 105° E.

отрицательные возмущения  $f_oF2$ . Как и в случае геомагнитной бури в марте 2015 г., на фазе восстановления 28 сентября формируются отрицательные возмущения, которые 29–30 сентября сменяются дневными положительными и ночными отрицательными возмущениями  $f_oF2$ . Исходя из подобия ионосферных возмущений во время бурь на станции Иркутск в марте 2015 и в сентябре 2011 г. и удовлетворительного качественного согласия результатов расчетов с данными наблюдений, мы имеем возможность исследовать механизмы формирования ионосферных возмущений. На рис. 5 показаны временные вариации широтных профилей возмущений TEC по данным GPS наблюдений, а также TEC,  $f_oF2$ , меридиональной скорости термосферного ветра,  $n(O)/n(N_2)$  и  $n(N_2)$ , рассчитанные в модели ГСМ ТИП в период геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 г. на долготе 105° E. Видно, что возмущения TEC и  $f_oF2$  похожи, но не коррелируют между собой (на одной и той же широте возмущения TEC и  $f_oF2$  в одно и то же время могут иметь разные знаки). При этом рассчитанные возмущения TEC согласуются с данными наблюдений. Обратим внимание на формирование отрицательных возмущений TEC и  $f_oF2$  в высоких широтах и положительных возмущений на низких широтах и на экваторе. Вариации меридиональной скорости термосферного ветра ответственны за положительные возмущения на средних и субавроральных широтах в главную фазу геомагнитной бури. Отрицательные возмущения в высоких и средних широтах 27 и 28 сентября связаны с уменьшением отношения  $n(O)/n(N_2)$  в дневное время и с ростом  $n(N_2)$  ночью. Следует выделить:

- 1) положительные возмущения в низкоширотной ионосфере, связанные с ростом  $n(O)/n(N_2)$  во время бури;
- 2) формирование положительных возмущений электронной концентрации в восстановительную фазу геомагнитной бури в F-области среднеширотной ионосферы днем за счет увеличения  $n(O)/n(N_2)$ , а ночью, несмотря на уменьшение  $n(N_2)$ , формирование отрицательных эффектов из-за недозаполнен-

ности плазменных трубок в результате их опустошения в главную фазу геомагнитной бури.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ МК-4866.2014.5, РФФИ № 14-05-00578, 15-35-20364.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 4. С. 612–619.
- Balan N., Alleyne H., Otsuka Y., et al. McCrea I. Relative effects of electric field and neutral wind on positive ionospheric storms // Earth Planets Space. 2009. V. 61, N 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. 2013. V. 118. doi:10.1002/jgra.50275.
- Heelis R.A., Sojka J.J., David M., Schunk R.W. Stormtime density enhancements in the middle latitude dayside ionosphere // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A03315. doi:10.1029/2008JA013690.
- Mannucci A.J., Tsurutani B.T., Iijima B.A., et al. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween Storms” // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L12S02. doi:10.1029/2004GL021467.
- Pröls G.W. Ionospheric F-region storms // In Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2. Ed. by Volland H. Boca Raton. CRC Press. 1995. P. 195–248.
- 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 Physics. 2013. V. 118. doi:10.1002/jgra.50439.
- Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Verkhoglyadova O.P., Lakhina G.S. Comment on “Storming the Bastille: the effect of electric fields on the ionospheric F-layer” by Rishbeth et al. (2010) // Ann. Geophys. 2013. V. 31. doi:10.5194/angeo-31-145-2013.

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

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия