

СРАВНЕНИЕ ВКЛАДОВ РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В ОТКЛИКЕ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ В ВЕСЕННИЙ СЕЗОН

К.В. Белюченко^{1,2}, М.В. Клименко², К.Г. Ратовский³, В.В. Клименко²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия,

kdei@list.ru

³Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

COMPARISON BETWEEN CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ALTITUDE INTERVALS TO THE RESPONSE OF REGIONAL ELECTRON CONTENT AT HIGH LATITUDE TO GEOMAGNETIC STORMS IN SPRING

K.V. Belyuchenko^{1,2}, M.V. Klimenko², K.G. Ratovsky³, V.V. Klimenko²

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Kaliningrad, kdei@list.ru

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. На основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) были проведены расчеты отклика регионального электронного содержания ионосферы (РЭС) в высоких широтах для бури 17 марта 2015 г. и для изолированной эталонной геомагнитной АЕ бури, полученной усреднением вариации АЕ-индекса методом наложения эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму АЕ-индекса. В данной работе будет рассматриваться вклад трех высотных интервалов (80–300 км, 300–800 км и 800–20000 км) в отклик высокоширотного РЭС на геомагнитные бури.

Ключевые слова: численное моделирование, геомагнитные бури, ионосферные возмущения, региональное электронное содержание.

Abstract. Based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP), the response of the regional electron content of the ionosphere (REC) at high latitudes was calculated for the storm of March 17, 2015 and for an isolated reference geomagnetic AE storm obtained by averaging the AE index variation using the superposition of epochs with key moments corresponding to the AE index maximum. In this paper, the contribution of three altitude intervals (80–300 km, 300–800 km and 800–20000 km) to the response of high-latitude REC to geomagnetic storms will be considered.

Keywords: numerical modeling, geomagnetic storms, ionospheric disturbances, regional electron content.

ВВЕДЕНИЕ

Система ионосфера-протоносфера Земли играет ключевую роль в распространении коротковолновых радиосигналов и оказывает существенное влияние на космическую радиосвязь, радиолокацию, навигацию и работу систем позиционирования навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Восстановленные значения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы по данным измерений задержек сигналов глобальных навигационных спутниковых систем являются весьма удобным параметром для анализа изменчивости ионосферы, как в глобальном, так и в региональном масштабе. Полное электронное содержание состоит из ионосферного и плазмосферного электронного содержания. Довольно часто плазмосферный резервуар игнорируется при анализе и оценке данных ПЭС исходя из следующих двух предположений: (1) величина плазмосферного вклада в ПЭС на несколько порядков меньше ионосферного вклада [Gallagher et al., 2000]; (2) вариации ПЭС и NmF2 сильно коррелируют [Liu et al., 1996]. За последние 20 лет различными коллективами авторов [Lunt et al., 1999; Balan et al., 2002; Gulyaeva and Gallagher, 2007; Lee et al., 2013;

Klimenko et al., 2015] было установлено, что предыдущие оценки вклада плазмосферы в ПЭС являются заниженными, и процентный вклад плазмосферы может при определенных условиях быть весьма значительным (более 50 % от значения ПЭС). Эта недооценка плазмосферного резервуара и привела к тому, что у многих ученых выработался стереотип о малом вкладе плазмосферы в ПЭС по сравнению с вкладом ионосферы.

Следует заметить, что ионосферно-плазмосферные возмущения являются следствием изменений космической погоды, вызываемых, в том числе геомагнитными бурями. В недавних работах было показано, что возмущения NmF2 и ПЭС во время геомагнитных бурь могут значительно отличаться даже по знаку возмущений [Klimenko et al., 2018]. К настоящему моменту остается открытым вопрос об изменении плазмосферного вклада в ПЭС во время геомагнитных бурь. На этот вопрос мы попытаемся дать ответ в данной статье. Исследования будут основываться на результатах численного моделирования отклика системы ионосфера-плазмосфера на геомагнитные бури и на экспериментальной базе данных глобальной сети приемников сигналов ГЛОНАСС и GPS.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основой данного исследования являются результаты расчетов проведенные на Глобальной Самоогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) для геомагнитной бури 17–23 марта 2015 г. и для изолированной эталонной геомагнитной АЕ бури в весеннее равноденствие. На рис. 1 показаны вариации АЕ-индексов для этих геомагнитных бурь. Эталонная геомагнитная АЕ буря была получена усреднением вариации АЕ-индекса методом наложения эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму АЕ-индекса для изолированных событий. Были проведены расчеты отклика регионального электронного содержания ионосферы (РЭС) в высоких широтах, представляющего собой интеграл ПЭС по всем долготам в интервале широт от северного/южного полюса до 60° северной/южной широты. Эталонный отклик РЭС рассчитывался по следующей схеме: расчет РЭС по картам полного электронного

содержания на основании результатов моделирования и по данным наблюдений; расчет возмущений РЭС, как отклонений модельных/наблюдаемых значений от фоновых значений (в случае наблюдений от 27-дневного скользящего среднего значения РЭС); расчет эталонного наблюдаемого отклика РЭС усреднением возмущений методом наложенных эпох.

На рис. 1 также показан отклик высокоширотного РЭС в северном и южном полушарии для эталонной геомагнитной бури (черная линия) и бури марта 2015 г. (розовая линия). Разница в амплитудах отклика РЭС на эти бури связана с разницей в АЕ-индексе для этих бурь. Можно также отметить и разницу между этими событиями в возмущении РЭС на фазе восстановления. Для эталонной бури вариации РЭС день-ото-дня незначительны в сравнении с бурей марта 2015 г. Возмущения РЭС в южном полушарии на 20% сильнее для бури марта 2015 г., а возмущения РЭС для эталонной бури практически одинаковые для обоих

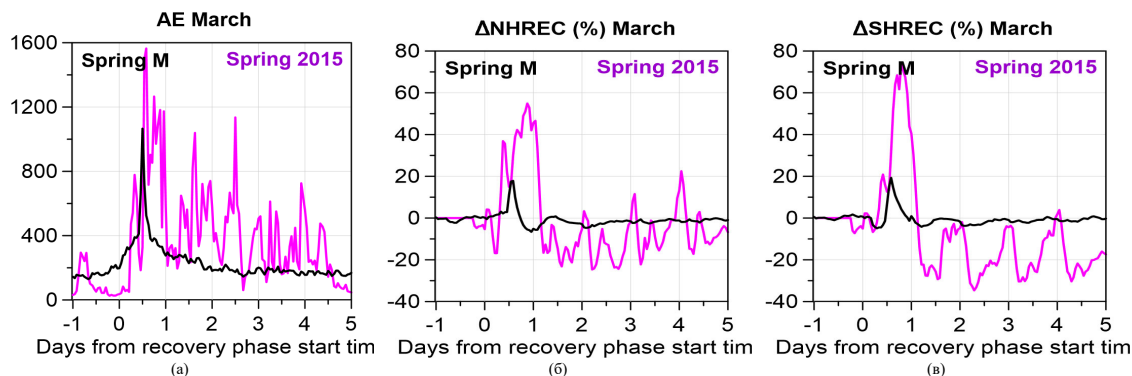


Рис. 1. Вариации АЕ-индекса (а) и возмущений высокоширотного РЭС для северного (б) и южного полушарий (в) для весенних бурь. Черной линией показаны вариации для эталонной геомагнитной бури, розовой для бури марта 2015 г.

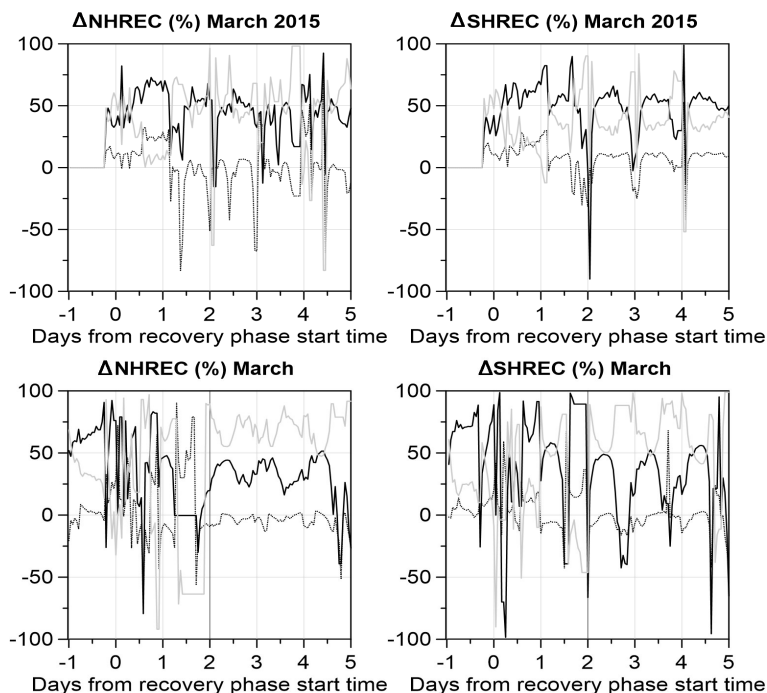


Рис. 2. Процентный вклад возмущений высокоширотного РЭС для бури марта 2015 г. (верхняя панель) и для эталонной весенней бури (нижняя панель). Пунктирной линией отмечен вклад в возмущения РЭС высотного диапазона 800–20000 км, черной линией — диапазона 300–800 км и серой линией — диапазона 80–300 км

полушарий. Для изолированной эталонной бури имеет место слабый отрицательный эффект в РЭС, а для бури марта 2015 г. видны сильные отрицательные возмущения в обоих полушариях.

Кроме того, были проанализированы вклады различных высотных диапазонов (80–300 км, 300–800 км и 800–20000 км) в возмущения высокоширотных РЭС. Мы рассчитывали вклад в процентах возмущений РЭС для конкретного высотного диапазона относительно возмущений РЭС, рассчитанного для полного диапазона высот (80–20000 км). На рис. 2 представлены процентные вклады в возмущения РЭС различных высотных диапазонов.

Анализируя результаты моделирования, можно отметить следующее: 1) возмущения на высоте 800–20000 км вносят наименьший вклад в общие возмущения РЭС для всех рассмотренных случаев (исключением является главная фаза бури); 2) на фазе восстановления основной вклад в возмущения РЭС вносят высоты 80–300 км; 3) согласно результатам моделирования отсутствует межполушарная асимметрия вкладов различных высотных диапазонов в возмущения РЭС; 4) перед началом бури вклады возмущений РЭС для диапазонов 80–300 км и 300–800 км примерно одинаковы для марта 2015 г., а для эталонной бури вклад диапазона 300–800 км больше, что связано с различиями в солнечной активности для рассмотренных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проанализированы вклады различных высотных диапазонов в возмущения высокоширотного РЭС для бури 17 марта 2015 г. и для эталонной весенней бури. В качестве основных результатов можно сказать следующее: перед началом бури вклады возмущений для высот 80–300 км и 300–800 км примерно одинаковы, а на фазе восстановления

основной вклад в возмущения вносят высоты 80–300 км. Во время главной фазы геомагнитной бури вклад высотного диапазона 800–20000 км возрастает до 30 % (в остальное время он минимален 5–10 %).

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (идентификационный номер проекта 116234986).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Balan N., Otsuka Y., Tsugawa T. et al. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity // *Earth, planets and space*. 2002. V. 54. P. 71–79.

Gallagher D.L., Craven P.D., Comfort R.H. Global core plasma model // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000. V. 105, N A8. P. 18819–18833.

Gulyaeva T.L., Gallagher D.L. Comparison of two IRI electron-density plasmasphere extensions with GPS-TEC observations // *Adv. Space Res.* 2007. V. 39, N 5. P. 744–749.

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. Atmosphere. Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 180. P. 78–92.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak I.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, N 8. P. 2077–2085.

Lee H.B., Jee G., Kim Y.H., Shim J.S. Characteristics of global plasmaspheric TEC in comparison with the ionosphere simultaneously observed by Jason-1 satellite // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, N 2. P. 935–946.

Liu J.Y., Tsai H.F., Jung T.K. Total electron content obtained by using the global positioning system // *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* 1996. V. 7, N 1. P. 107–117.

Lunt N., Kersley L., Bailey G.J. The influence of the protonosphere on GPS observations: Model simulations // *Radio Sci.* 1999. V. 34, N 3. P. 725–732.