

СИСТЕМА ИОНОСФЕРА-ПЛАЗМОСФЕРА В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ И ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В СЕНТЯБРЕ 2011 ГОДА

И.А. Носиков¹, В.В. Клименко², М.В. Клименко^{1,2}, И.Е. Захаренкова², К.Г. Ратовский³,
Ю.В. Ясюкевич³, А.А. Мыльникова³

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград,
e-mail: igor.nosikov@gmail.com

²Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация. Принято считать, что суточные, сезонные и другие изменения полного электронного содержания происходят только за счет изменений его ионосферной части, а вклад плазмосферы в эти изменения настолько мал, что не оказывает существенного влияния. В данной статье представлены данные спутниковых и наземных наблюдений, а также результаты модельных расчетов основных параметров системы ионосфера-плазмосфера в спокойных условиях и в главную фазу геомагнитной бури 26 сентября 2011 года. При этом удалось выявить роль ионосферы и плазмосферы в динамике полного электронного содержания во время геомагнитной бури.

Введение. До сих пор все еще остаются нерешенными многие вопросы физики околоземного космического пространства. В частности, не в полной мере исследован вопрос вклада плазмосферы в полное электронное содержание в спокойных геомагнитных условиях и его изменение во время геомагнитных бурь. Решение данного вопроса позволит внести вклад в понимание процессов происходящих в ионосфере, а также имеет практическую значимость, особенно для совершенствования позиционирования с одночастотными приемниками сигналов спутниковых навигационных систем и измерений вертикального полного электронного содержания GPS TEC (Global Positioning System Total Electron Content).

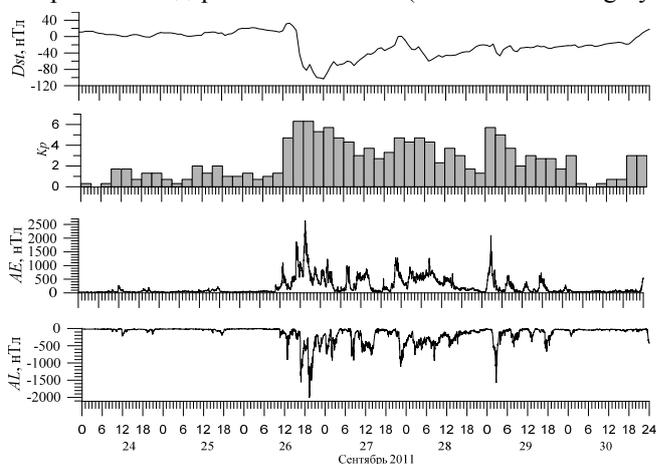


Рисунок 1. Поведение индексов геомагнитной активности Dst , K_p , AL и AE в период 24–30 сентября 2011 г.

экваториальных широт. Входные параметры модели при расчете ионосферных эффектов геомагнитной бури задавались так же, как и в (Klimenko et al., 2011). Отличительной особенностью данных расчетов является то, что высыпания энергичных частиц задавались по модели (Воробьев и Ягодкина, 2007). Данные наземных и спутниковых наблюдений использовались для проверки результатов модельных расчетов при описании поведения параметров системы ионосфера-плазмосфера.

Сравнительный анализ данных наблюдений и результатов расчетов модели ГСМ ТИП

На рис. 2 показано поведение среднеширотной ионосферы (суточные вариации f_oF_2 , h_mF_2 и TEC) над Иркутском в спокойных условиях и в главную фазу геомагнитной бури. Эти результаты были получены с использованием модели ГСМ ТИП, данных измерений ионозонда DPS-4 и приемника GPS сигнала.

Модельные результаты и данные вертикального зондирования хорошо согласуются между собой. В главную фазу бури 26 сентября в поведении критической частоты $foF2$ и полного электронного содержания TEC наблюдается отрицательный эффект, который в $foF2$ выражен сильнее, чем в TEC , то есть среднеширотная ионосфера в главную фазу бури более изменчива, чем плазмосфера. В поведении высоты максимума $F2$ слоя результаты расчетов и данные наблюдений выявляют еще более лучшее согласие. В главную фазу бури 26 сентября высота $F2$ слоя дважды значительно возрастает (на ~ 120 км).

Высотой перехода O^+/H^+ является граница, разделяющая ионосферу и плазмосферу, выше которой доминируют ионы H^+ . В настоящее время появилось достаточно много работ, посвященных исследованию этого параметра (Heelis et al., 2008; Balan et al., 2012). На рис. 3 показаны глобальные карты высоты перехода O^+/H^+ для 20:00 UT в спокойных геомагнитных условиях в сентябре 2011 года и во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года. Видно, что в спокойных условиях максимум высоты перехода формируется днем на авроральных широтах и превышает 2000 км, а на средних и низких широтах не превышает 1000 км. Геомагнитная буря 26 сентября оказывает влияние на поведение высоты перехода, что находит отражение в глобальном увеличении высоты перехода на 100 – 200 км.

Отдельное внимание мы уделили проблеме оценки вклада плазмосферного электронного содержания (PEC) в полное электронное содержание (TEC). В большинстве предыдущих исследований оценивался вклад PEC в TEC для достаточно ограниченных пространственных областей и только для спокойных условий. Нами была поставлена задача исследования данной проблемы в глобальном масштабе с использованием данных наблюдений и модели ГСМ ТИП. Для этого нами были построены глобальные карты TEC (на основе IGS GPS карт), ионосферного электронного содержания (IEC) по данным измерений радиозатменным методом на спутнике COSMIC и PEC , как разность TEC и IEC , что позволяет оценить вклад PEC в GPS TEC по сравнению с вкладом IEC . Отметим, что PEC измеряется от высоты 700 км (высота орбиты COSMIC) до высоты 20200 км (высота орбит спутников GPS).

На рис. 4 представлены глобальные карты TEC для 20:00 UT в спокойных условиях и возмущения TEC во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года по данным GPS спутников и результатам расчетов по модели ГСМ ТИП от 80 до 20000 км. Наблюдается хорошее согласие между результатами модельных расчетов и данными спутниковых наблюдений. На глобальных картах TEC в спокойных условиях видна область экваториальной аномалии, а также главный ионосферный провал.

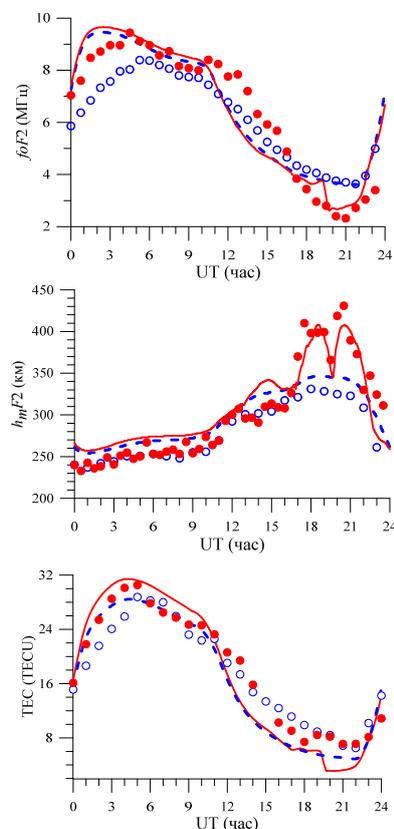


Рисунок 2. Суточные вариации $foF2$, h_mF2 , TEC для среднеширотной станции Иркутск для спокойного дня (кольца и штриховые кривые) и во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года (сплошные кривые и кружки) по данным ионозонда DPS-4, GPS приемника и расчетов на модели ГСМ ТИП.

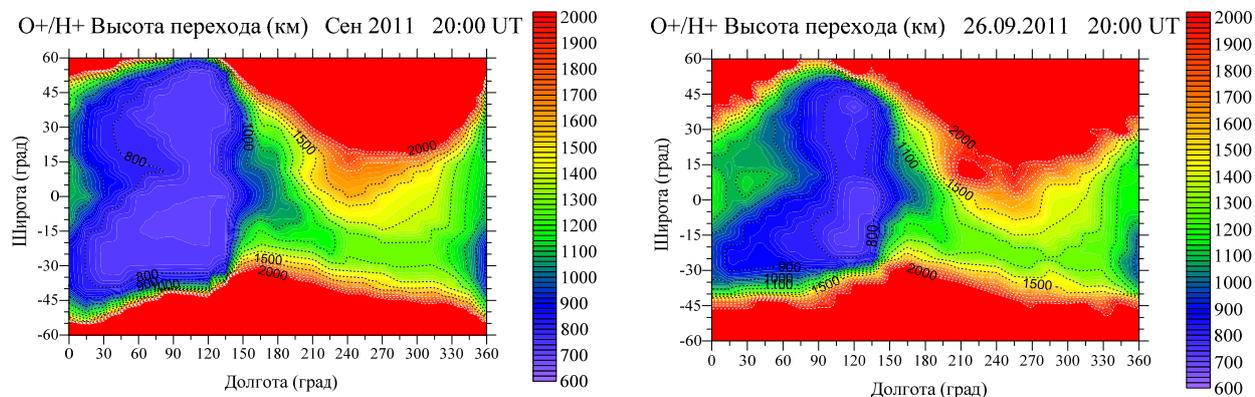


Рисунок 3. Глобальные карты высоты перехода O^+/H^+ для 20:00 UT в спокойных условиях и во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года, построенные на основе результатов расчетов модели ГСМ ТИП.

Во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года наблюдается рост электронной концентрации практически в глобальном масштабе. Особенно значительный рост электронной концентрации формируется в дневное время на средних широтах в американском долготном секторе (географические долготы 270–300°E), где электронная концентрация возрастает в полтора раза.

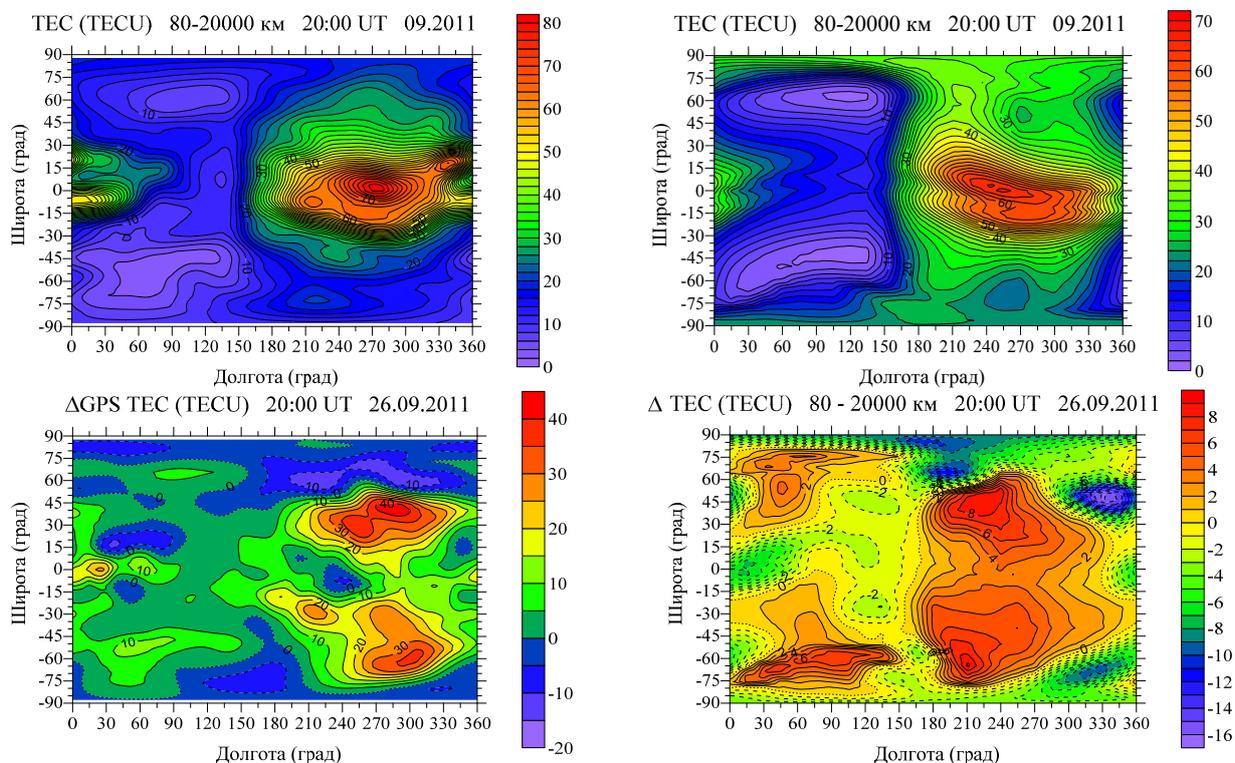


Рисунок 4. Глобальные карты *TEC* для 20:00 UT в спокойных условиях (вверху) и возмущения *TEC* во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года (внизу) по данным GPS спутников (слева) и по результатам расчетов с использованием модели ГСМ ТИП (справа).

На рис. 5 показаны глобальные карты *IEC* и *PEC*, построенные по данным спутников COSMIC и GPS и по результатам расчетов с использованием модели ГСМ ТИП для 20:00 UT в спокойных условиях в сентябре 2011 года, а также изменения этих параметров, вызванные геомагнитной бурей 26 сентября 2011 года. Экспериментальные данные и результаты модельных расчетов, показанные на рис. 5, хорошо согласуются как по абсолютным значениям *TEC*, так и в целом в глобальном распределении по широтам и долготам. Из рис. 5 (слева) также видно, что геомагнитная буря 26 сентября оказывает влияние на параметры *IEC* и *PEC*, в результате чего они увеличиваются на 4–6 TECU.

Оценку вклада *PEC* в *TEC* удобно представить в виде карт отражающих процентный вклад *PEC* в *TEC*, которые показаны на рис. 6. Отметим, что для отдельных областей вклад *PEC* достигает 80–85%, что говорит о существенном вкладе плазмосферы в полное электронное содержание. Представленные на рис. 6 глобальные карты *PEC* для спокойных и возмущенных условий позволяют оценить относительное возрастание вклада *PEC* в *TEC* в главную фазу бури. При этом в главную фазу бури на средних и экваториальных широтах Евразии формируются пространственные области, где *PEC* возрастает на 20–25%, что говорит о возрастании роли плазмосферы/протоносферы в главную фазу геомагнитной бури при решении задач позиционирования с помощью современных навигационных спутниковых систем.

Заключение

На основе экспериментальных данных и результатов расчетов с использованием модели ГСМ ТИП была проведена сравнительная оценка влияния геомагнитной бури 26 сентября 2011 года на ряд важнейших параметров системы ионосфера-плазмосфера таких, как критическая частота f_oF_2 , высота максимума h_mF_2 , полное электронное содержание *TEC*, ионосферное электронное содержание *IEC*, плазмосферное электронное содержание *PEC* и высота перехода O^+/H^+ .

Результаты исследования показали, что плазмосфера вносит существенный вклад в *TEC*, особенно в послезаходные часы, который может достигать 80–85%, причем в некоторых областях он еще больше возрастает в главную фазу геомагнитной бури. Проведенный анализ показал, что значения параметров системы ионосфера-плазмосфера и их возмущения во время геомагнитной бури, рассчитанные по модели

ГСМ ТИП достаточно близки к реально наблюдаемым. Это позволяет использовать результаты наших модельных расчетов для интерпретации наблюдаемых возмущений путем детального анализа возмущений параметров системы термосфера-ионосфера-плазмосфера.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ МК-4866.2014.5 (Носиков И.А., Клименко М.В., Захаренкова И.Е.) и РФФИ №14-05-00578 (Ратовский К.Г.), а также программы 22 (Клименко В.В.).

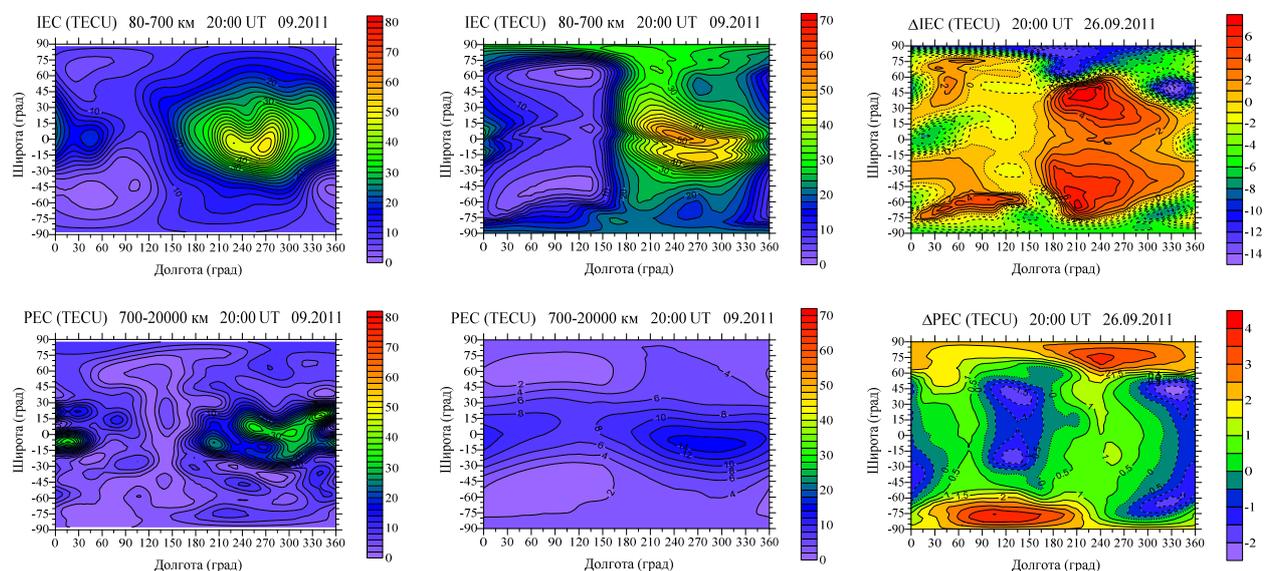


Рисунок 5. Глобальные карты параметров ИЕС (вверху) и ПЕС (снизу) построенные по данным спутников COSMIC и GPS (слева) и результатам расчетов модели ГСМ ТИП (посередине) для 20 UT спокойного дня сентября 2011 года, а также возмущения этих параметров, вызванные геомагнитной бурей 26 сентября 2011 года (справа).

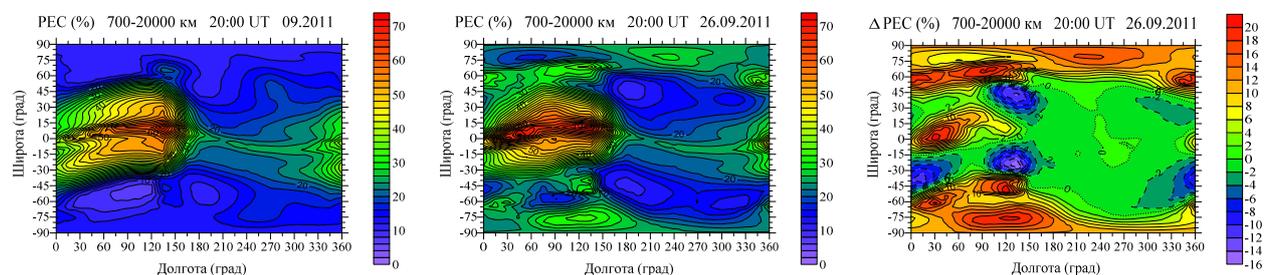


Рисунок 6. Глобальные карты процентного вклада ПЕС в ТЕС, построенные по результатам для 20 UT спокойного дня сентября 2011 года (слева) и во время геомагнитной бури 26 сентября 2011 года (посередине), а также их разница (справа).

Литература

- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. (2007) Динамика авроральных высыпаний в периоды сильных магнитных бурь. Геомагнетизм и аэронавигация. 47(2), 198–205.
- Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. (2006). Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет. Геомагнетизм и аэронавигация, 46(4), 485–494.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Vesnin A.M. (2011). Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005. Radio Sci., 46, RS0D03, doi:10.1029/2010RS004590.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushenko T.A., Naumova N.M. (1988). Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System. PAGEOPH, 127(2/3), 219–254.
- Heelis R.A., Coley W.R., Burrell A.G., Hairston M.R., Earle G.D., Perdue M.D., Power R.A., Harmon L.L., Holt B.J., and Lippincott C.R. (2009). Behavior of the O⁺/H⁺ transition height during the extreme solar minimum of 2008, Geophys. Res. Lett., 36, L00C03.
- Balan N., Chen C.Y., Rajesh P.K., Liu J.Y., and Bailey G.J. (2012). Modeling and observations of the low-latitude ionosphere-plasmasphere system at long deep solar minimum. J. Geophys. Res. 117, A08316.