

ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЫВОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ ФАЗЫ GPS И СБОЕВ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ 15 МАЯ 2005 г. И 20 НОЯБРЯ 2003 г.*

GLOBAL DISTRIBUTION OF GPS LOSSES OF PHASE LOCK AND TOTAL ELECTRON CONTENT SLIPS DURING THE 2005 MAY 15 AND THE 2003 NOVEMBER 20 MAGNETIC STORMS*

Ю.В. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия*

Э.И. Астафьева

*Парижский институт физики Земли,
Париж, Франция, astafyeva@ipgp.fr*

И.В. Живетьев

*Институт космических исследований и распростра-
нения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, i.zhivetiev@gmail.com*

А.П. Максиков

*Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, 79293@mail.ru*

Yu.V. Yasyukevich

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

E.I. Astafyeva

*Institut de Physique du Globe de Paris,
Paris, France, astafyeva@ipgp.fr*

I.V. Zhivetiev

*Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propa-
gation FEB RAS,
Paratunka, Russia, i.zhivetiev@gmail.com*

A.P. Maksikov

*Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, 79293@mail.ru*

Аннотация. На основе данных глобальной сети приемников GPS рассмотрены срывы сопровождения фазы навигационного сигнала GPS во время двух сильных магнитных бурь. Показано, что плотность сбоев на основной частоте L1 увеличивается до 0.25 %, на вспомогательной частоте L2 — до 3 %, в разы превышая фоновый уровень. Число сбоев измерения полного электронного содержания (ПЭС) во время супербури 20 ноября 2003 г. возросло в ~50 раз относительно фонового уровня. Обнаружено, что во время супербури наибольшее число сбоев сопровождения фазы наблюдается в регионах низких и высоких широт. В то же время область наибольших сбоев измерения ПЭС соответствует границам аврорального овала.

Ключевые слова: магнитная буря, GPS, срывы сопровождения фазы, сбой измерения ПЭС, авроральный овал.

Abstract. Using data of worldwide network of GPS receivers we investigated losses of GPS phase lock (LoL) during two strong magnetic storms. At fundamental L1 frequency, LoL density is found to increase up to 0.25 % and at L2 frequency the increase is up to 3 %. This is several times as much compared with the background level. During the 2003 November 20 magnetic storm, the number of total electron content (TEC) slips exceeded the background level ~50 times. During superstorms, the most number of GPS LoL is observed at low and high latitudes. At the same time, the area of numerous TEC slips correspond to auroral oval boundaries.

Key words: magnetic storm, GPS, loss of phase lock, TEC slips, auroral oval.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставили широкие возможности для решения задач позиционирования по всему земному шару [Hofmann-Wellenhof et al., 1992], а также задач мониторинга ионосферной плазмы в глобальном масштабе [Афраймович, Первалова, 2006; Afraimovich et al., 2013]. Во время магнитных бурь ионосфера претерпевает существенные изменения. Отдельные явления, называемые супербурями, приводят к качественному изменению глобальной динамики ионосферной плазмы: может наблюдаться

развитие суперфонтан-эффекта, при котором значения полного электронного содержания (ПЭС) в гребнях экваториальной аномалии достигают 180–200 TECU, а также регистрируется значительное смещение гребней экваториальной аномалии на 10–15° от положения в спокойных условиях [Tsurutani et al., 2004; Mannucci et al., 2005; Astafyeva et al., 2007; Astafyeva, 2009a, b].

Ионосферные эффекты во время сильных бурь могут приводить к нарушению работы радиотехнических систем, в том числе и ГНСС. Мерцания амплитуды навигационного сигнала вследствие рассеяния

*Впервые статья опубликована на английском языке в журнале «Space Weather» 2014. V. 12, N 7. P. 508–525, DOI:10.1002/2014SW001072. На русском языке публикуется впервые в сокращенном варианте по лицензии издательства «John Wiley and Sons».

на мелкомасштабных неоднородностях, а также мерцания фазы могут приводить к срыву сопровождения фазы сигнала и невозможности осуществлять оценку радиофизических параметров сигнала. Наиболее существенно на параметры сигнала влияют неоднородности размером порядка первой зоны Френеля [Yeh, Liu, 1982; Pi et al., 1997], для частот GPS (1.227 и 1.575 ГГц) это 150–300 м (для неоднородностей, расположенных на высотах E- и F-областей) [Yeh, Liu, 1982; Pi et al., 1997; Afraimovich et al., 2009].

Опубликовано большое количество работ, посвященных устойчивости GPS во время геомагнитных возмущений [Skone, de Jong, 2000, 2001; Doherty et al., 2001; Afraimovich et al., 2002, 2003, 2011; Ledvina et al., 2002; Jakowski et al., 2005, 2007; Basu et al., 2008; Rama Rao et al., 2009; Bergeot et al., 2011; Pi et al., 2011, 2013]. При этом в литературе практически не исследуются ни зависимость этих эффектов от интенсивности бури, ни пространственные особенности таких эффектов в глобальном масштабе.

В настоящей статье рассматриваются фазовые сбои GPS во время двух бурь: 15 мая 2005 г. и 20 ноября 2003 г. Буря 20 ноября 2003 г. является одной из супербурь 23-го цикла солнечной активности. Для бури 15 мая отсутствуют уверенные свидетельства в пользу того, что данное событие является супербурей, например смещение гребней экваториальной аномалии или значительное увеличение электронной концентрации в дневной ионосфере [Astafyeva, 2009a; Abreu et al., 2010].

Целью настоящей работы является анализ пространственного распределения срывов сопровождения фазы и сбоев измерения ПЭС во время указанных магнитных бурь.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных использовались данные глобальных и региональных сетей, представленные в формате RINEX [Gurtner, Estey, 2012]. Рассчитывались два основных параметра.

1. Плотность P срывов сопровождения фазы сигнала GPS на каждой станции и по всему земному шару отдельно для частот L1 и L2. Для этого рассчитывается число сбоев измерения N и полное число измерений S :

$$P = N / S \cdot 100 \% . \quad (1)$$

Для анализа эффектов на дневной и на ночной стороне ионосферы было рассчитано положение солнечного терминатора на высоте 200 км.

2. Число сбоев измерения ПЭС (далее — сбой ПЭС), определенного по фазовым измерениям. Использование именно фазовых измерений обусловлено существенно меньшим уровнем шумов по сравнению с групповыми [Куницын и др., 2007]. В качестве сбоя ПЭС мы принимали резкое изменение ПЭС относительно предыдущего значения. Для высоких широт ($\theta > 75^\circ$) предельное изменение, выше которого фиксировался сбой ПЭС, составляло 1 TECU/30 с, для средних широт ($25^\circ < \theta < 75^\circ$) — 2 TECU/30 с, для низких ($\theta < 25^\circ$) — 3 TECU/30 с.

Для построения пространственной картины распределения сбоев ПЭС мы рассчитывали сбой ПЭС для каждой станции, имеющейся в банке данных.

Для минимизации эффектов тропосферы использовались данные только тех спутников, которые поднялись над горизонтом выше чем на 10° . На рис. 1 представлено распределение плотности сбоев ПЭС в зависимости от угла места. Можно видеть, что наибольшее число сбоев ПЭС характерно для низких углов места. При этом плотность сбоев ПЭС резко падает при увеличении угла места и к $10\text{--}20^\circ$ становится достаточно мала. Отсечка по углу в 10° убирает из статистики большую часть фоновых сбоев ПЭС.

Стоит упомянуть, что большинство станций находится в средних широтах, поэтому глобальная статистика лучше отражает особенности именно этого региона.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показано расположение GPS-приемников, данные которых использовались для анализа магнитных бурь 15 мая 2005 г. и 20 ноября 2003 г. Как уже упоминалось, большая часть приемников расположена в регионе средних широт. Достаточно малое число приемников расположено на территории Африканского континента, России, а также океанов.

На рис. 3 приведены данные по срывам сопровождения фазы, а также сбоям ПЭС и вариациям индекса $SYM-H$ и B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в периоды обеих бурь. Для сравнения мы также рассчитали срывы сопровождения фазы и сбой ПЭС для спокойного дня. В качестве спокойного дня для 2005 г. выбрано 14 мая, для 2003 г. — 19 ноября.

Магнитная буря 15 мая 2005 г. началась в 02:40 UT с резкого изменения $SYM-H$ -индекса (рис. 3, а). Наибольшее развитие буря получила к 08:20 UT, когда $SYM-H$ -индекс достиг значения -302 нТл. Результаты [Dashora et al., 2009; Abreu et al., 2011] указывают на положительный отклик ионосферы сразу после внезапного начала бури. Наблюдалось также усиление фонтан-эффекта [Dashora et al., 2009; Ngwira et al., 2012], при этом не отмечалось возникновения суперфонтан-эффекта.

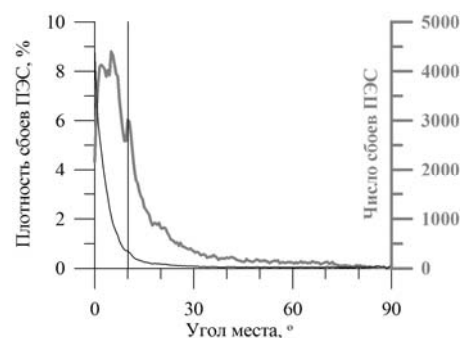


Рис. 1. Зависимость количества (толстая серая кривая) и плотности (тонкая черная кривая) сбоев ПЭС от угла места для спокойных условий

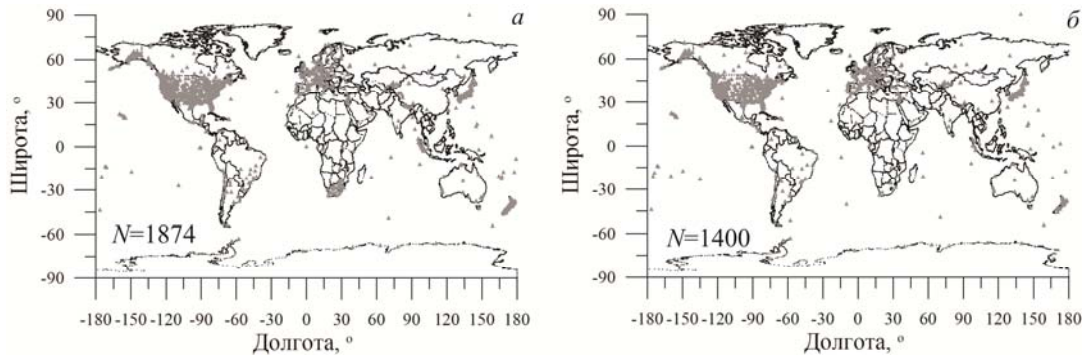


Рис. 2. Расположение приемников GPS в период магнитных бурь 15 мая 2005 г. (а) и 20 ноября 2003 г. (б). В левых нижних углах панелей приведено общее число приемников

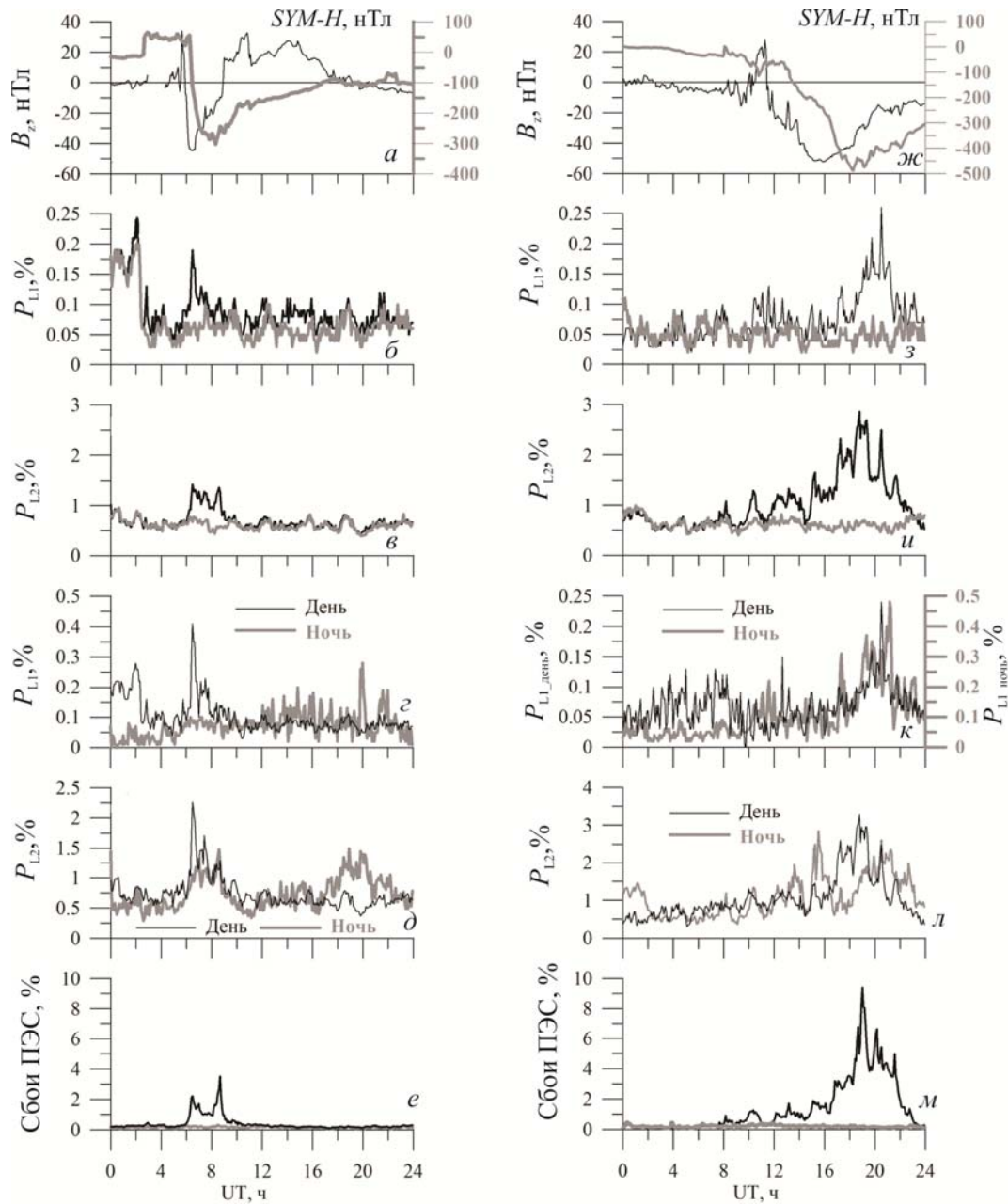
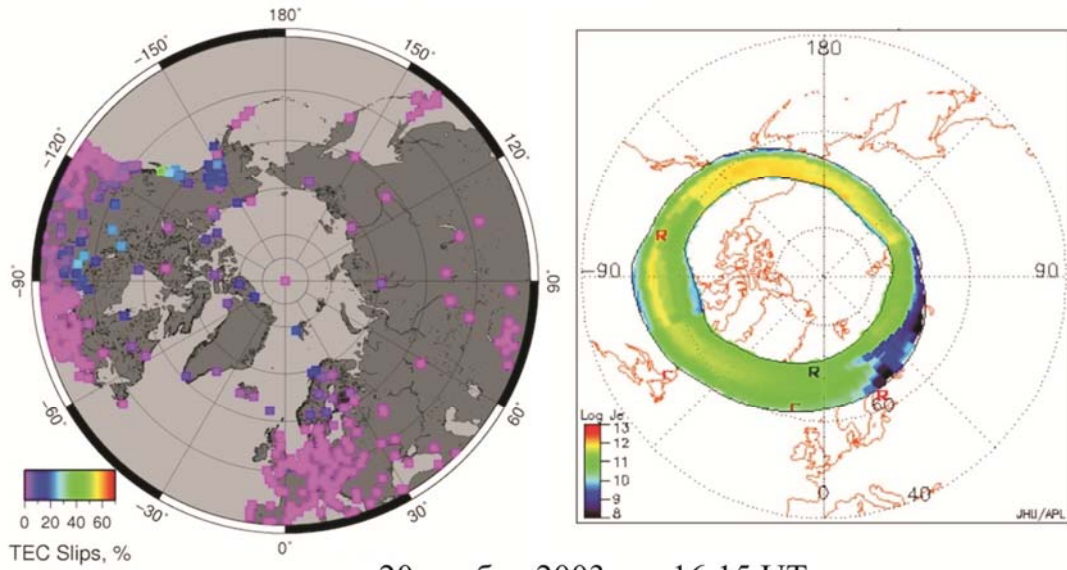


Рис. 3. Изменения плотности срывов сопровождения фазы, сбоев ПЭС, а также индексов геомагнитной активности во время бури 15 мая 2005 г. (а–е) и супербури 20 ноября 2003 г. (ж–м). Вариации индекса геомагнитной активности SYM-H (толстая серая кривая), а также B_z -компонента межпланетного магнитного поля (черная кривая) во время магнитных бурь (а, ж). Плотность P срывов сопровождения фазы на частотах L1 и L2 15 мая 2005 г. (б, в) и 20 ноября 2003 г. (з, и); серой кривой приведены данные для спокойного дня. Сбои фазы на дневной и ночной стороне во время бурь 15 мая 2005 г. (г, д) и 20 ноября 2003 г. (к, л); сбои ПЭС в периоды бурь (черная кривая) 15 мая 2005 г. (е) и 20 ноября 2003 г. (м) и для спокойного дня (серая кривая). В качестве спокойного дня для 2005 г. выбрано 14 мая, для 2003 г. — 19 ноября

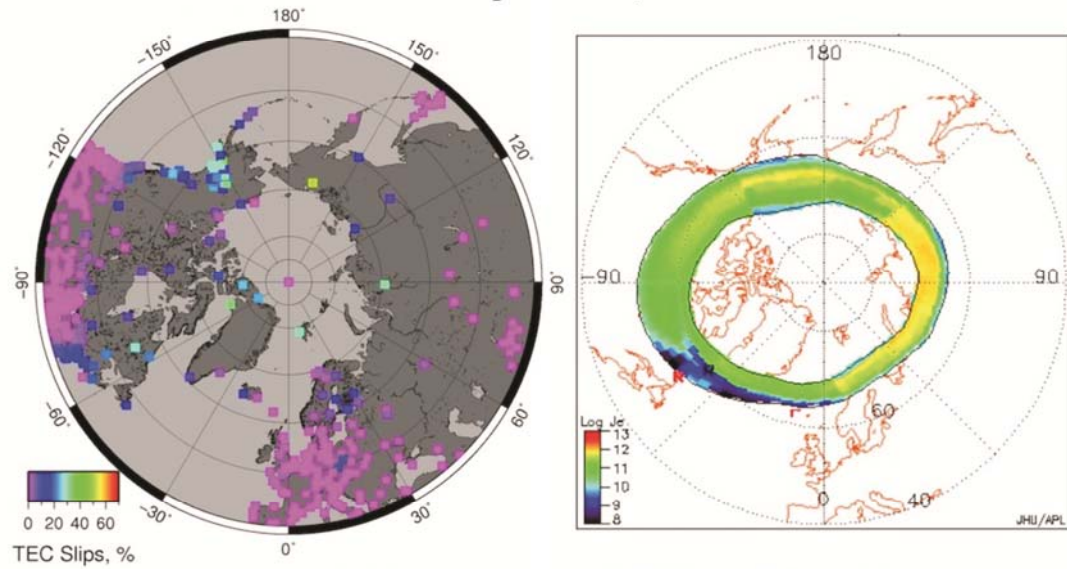
20 ноября 2003 г., ~10:15 UT

а



20 ноября 2003 г., ~16:15 UT

б



20 ноября 2003 г., ~20:45 UT

в

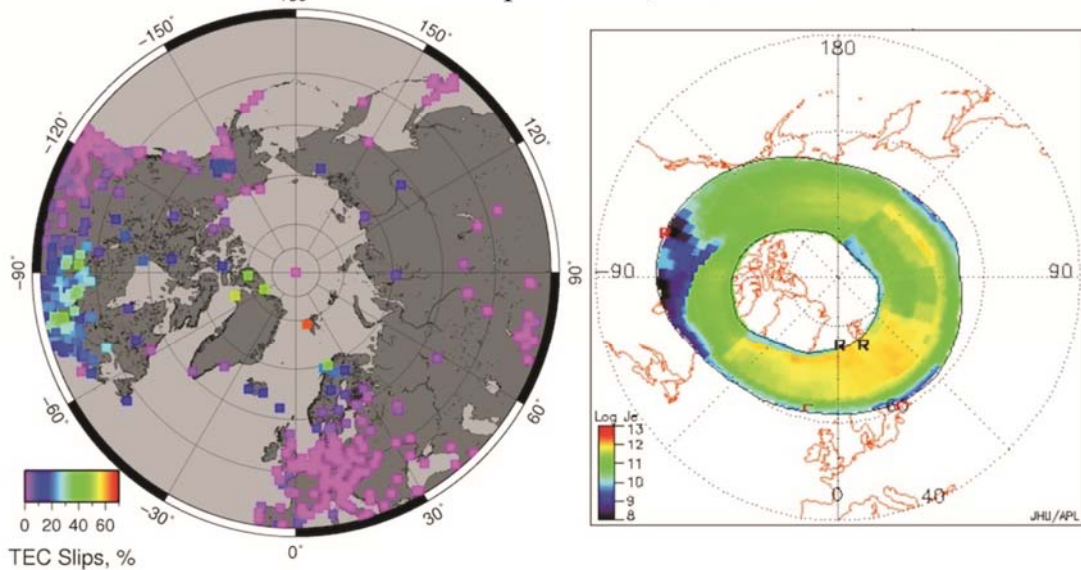
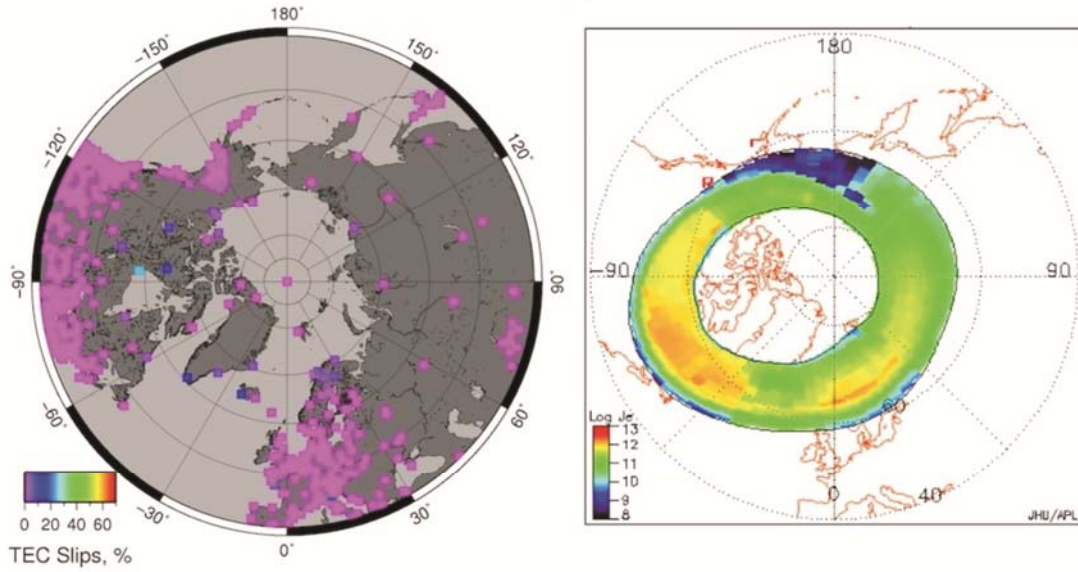


Рис. 4. Карта распределения сбоя ПЭС во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. в ~10:15 (а), ~16:15 (б), ~20:45 UT (в). Справа приведено положение аврорального овала по данным OVATION

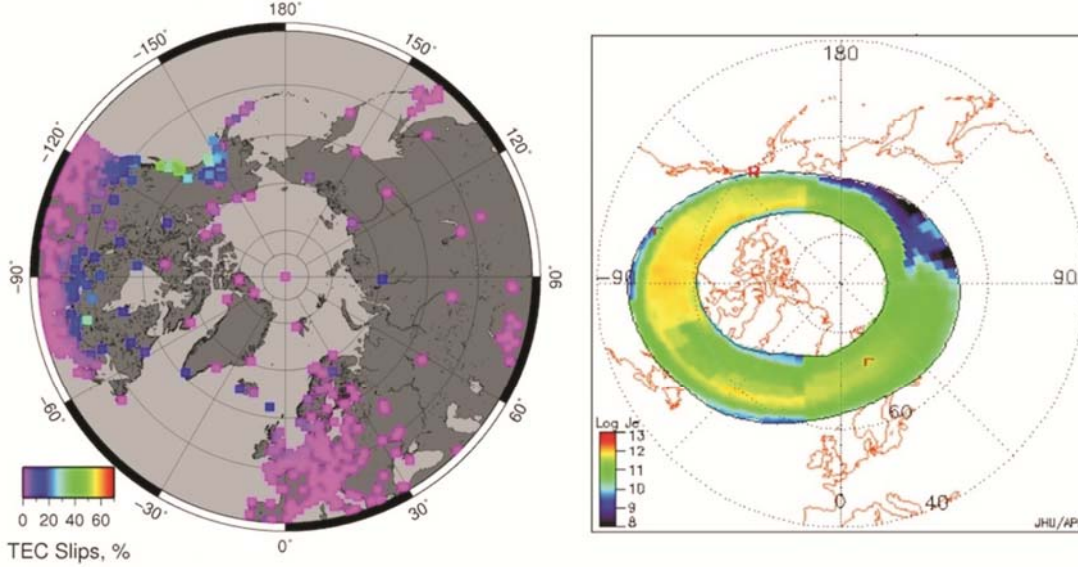
15 мая 2005 г., ~02:45 UT

a



15 мая 2005 г., ~06:00 UT

б



15 мая 2005 г., ~08:15 UT

в

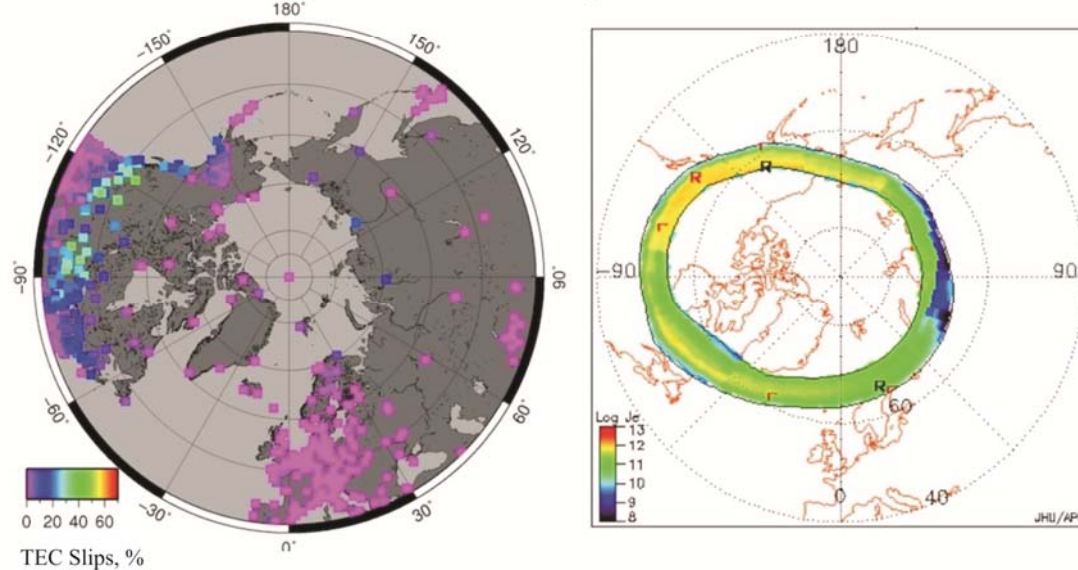


Рис. 5. Карта распределения сбояв ПЭС во время магнитной бури 15 мая 2005 г. в ~02:45 (a), ~06:00 (б) и ~08:15 UT (в). Справа приведено положение аврального овала по данным OVATION

Можно видеть, что для 2005 г. уровень срывов сопровождения фазы в спокойных условиях не превышает 0.05–0.1 % на частоте L1 и на частоте 0.8–1 % L2 (рис. 3, б, в). При этом в начале суток и в спокойных, и в возмущенных условиях наблюдается ступенчатое увеличение сбоев, практически одинаковое по величине. Основной вклад в увеличение плотности срывов сопровождения фазы навигационного сигнала дает дневная ионосфера.

Общее число сбоев ПЭС начинает расти после наступления главной фазы бури, достигая ~5500, или 3.5 % от общего числа наблюдений (рис. 3, е, черная кривая), что в ~7 раз превышает фоновый уровень (рис. 3, е, серая кривая). В целом имеется хорошая корреляция между резким изменением индекса *SYM-H*, плотностью срывов сопровождения фазы и числом сбоев ПЭС.

Супербуря, имевшая место 20 ноября 2003 г., была одной из наиболее сильных бурь в 23-м цикле солнечной активности [Basu et al., 2007; Mannucci et al., 2008; Zhao et al., 2008] и привела к генерации ионосферных неоднородностей различных масштабов и значительным изменениям в динамике ионосферы. Максимальное изменение *SYM-H*-индекса составило –488 нТл (рис. 3, ж), B_z -компоненты межпланетного магнитного поля — –52 нТл. Во время бури были зарегистрированы значения ПЭС до 160 TECU в полуденном и ~(170–180) TECU в постполуденном секторе [Mannucci, 2014]. Гребни экваториальной аномалии сдвинулись на 10° по широте относительно положения в спокойных условиях.

Плотность срывов сопровождения фазы достигла 0.25 % на частоте L1 к 20 UT (рис. 3, з). Максимальное значение плотности срывов сопровождения фазы на частоте L2 составило ~3 % в районе 19 UT (рис. 3, и). Можно видеть значительный вклад в общее число срывов сопровождения фазы как ночной, так и дневной стороны ионосферы (рис. 3, к, л).

Общее число сбоев ПЭС (рис. 3, м, черная кривая) начало резко возрастать после 14:30 UT, достигнув значения ~10 700, что в ~50 раз превышает фоновые значения (серая кривая).

Нами проведено сравнение пространственного распределения сбоев ПЭС и поступающей в магнитосферу энергии с использованием базы данных OVATION [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/]. Результаты представлены на рис. 4 и 5. Можно видеть, что на начальной фазе супербури 2003 г. в 10:15 UT (рис. 4, а) положение аврорального овала коррелирует с распределением сбоев ПЭС. Аналогичная картина наблюдается и для 16:15 UT (рис. 4, б). Во время главной фазы магнитной бури с 16:30 до 20:15 UT данные по энергии аврорального овала отсутствовали. В 20:45 UT граница аврорального овала наблюдалась на ~60° N в европейском секторе и ~52° N в североамериканском секторе (рис. 4, в).

Граница аврорального овала для этого времени проявляется также на картах сбоев ПЭС для всех долготных секторов, за исключением 60–90° W, где область значительного увеличения сбоев ПЭС доходит до 40° N. Такое несовпадение границ аврорального овала и области увеличения плотности сбоев ПЭС может быть связано с более значительным

расширением аврорального овала на средние широты, чем это представлено на карте распределения энергии, поступающей в магнитосферу. При этом вполне возможно, что данный факт обусловлен другими источниками генерации мелкомасштабных неоднородностей, такими как, например, плюмы (plume), зарегистрированные для магнитных бурь [Foster, Rideout, 2005], или интенсивные перемещающиеся ионосферные неоднородности [Astafyeva et al., 2008; Nishioka et al., 2009]. Аналогичный анализ был проведен для пространственного распределения срывов сопровождения фазы на частотах L1 и L2. В отличие от сбоев ПЭС наибольшее увеличение плотности срывов сопровождения фазы наблюдалось в авроральных и приэкваториальных широтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно отметить хорошее согласование роста числа срывов сопровождения фазы навигационного сигнала GPS и сбоев измерения ПЭС с индексом геомагнитной возмущенности *SYM-H*. Вероятность срыва сопровождения фазы как на основной, так и на вспомогательной частоте во время магнитных бурь увеличивается в несколько раз относительно спокойных условий. Еще более значительно возрастает число сбоев измерения ПЭС. Для рассмотренных бурь выявлено соответствие границ аврорального овала и области увеличения количества сбоев измерения ПЭС.

Мы выражаем благодарность сетям IGS [Dow et al., 2009], CORS, UNAVCO, Sonel, а также сетям в Новой Зеландии и Австралии за данные двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС.

Работа Ю.В. Ясюкевича поддержана грантом РФФИ № 14-35-50751_мол_нр и Программой стратегического развития ИГУ на 2012–2014 гг. (P212-ОУ-033), работа Э.И. Астафьевой — the European Research Council under the European Union's Seventh Framework Program (FP/2007–2013) / ERC Grant Agreement n. 307998.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006. 479 с.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 335 с.
- Abreu A.J. de, Fagundes P.R., Sahai Y., et al. Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A12312. DOI: 10.1029/2010JA015661.
- Abreu A.J. de, Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., Bitencourt J.A., Pillat V.G. An investigation of ionospheric F region response in the Brazilian sector to the super geomagnetic storm of May 2005 // Adv. Space Res. 2011. V. 48, N 7. P. 1211–1220. DOI: 10.1016/j.asr.2011.05.036.
- Afraimovich E.L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I., Voyeikov S.V. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals // Ann. Geophys. 2002. V. 45, N 1. P. 55–71.
- Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of performance of the navigation GPS system in geomagnetically disturbed condition // GPS Solutions. 2003. V. 7, iss. 2. P. 109–119.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Gaymayunov I.F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43, N 6. P. 964–972. DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.015.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Kosogorov E.A., Yasuykevich Y.V. The mid-latitude field-aligned disturbances and their effects on differential GPS and VLBI // *Ibid.* 2011. V. 47, N 10. P. 1804–1813. DOI: 10.1016/j.asr.2010.06.030.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // *J. Space Weather Space Clim.* 2013. V. 3, A27.

Astafyeva E. Effects of strong IMF B_z southward events on the equatorial and mid-latitude ionosphere // *Ann. Geophys.* 2009a. V. 27. P. 1175–1187.

Astafyeva E.I. Dayside ionospheric uplift during strong geomagnetic storms as detected by the CHAMP, SAC-C, TOPEX and Jason-1 satellites // *Adv. Space Res.* 2009b. V. 43. P. 1749–1756. DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.036.

Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Kosogorov E.A. Dynamics of total electron content distribution during strong geomagnetic storms // *Ibid.* 2007. V. 39. P. 1313–1317. DOI: 10.1016/j.asr.2007.03.006.

Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Voeykov S.V. Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling // *Ibid.* 2008. V. 41, N 9. P. 1459–1462. DOI: 10.1016/j.asr.2007.03.059.

Basu S., Basu S., Rich F.J., et al. Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A08308. DOI: 10.1029/2006JA012192.

Basu S., Basu S., Makela J.J., et al. Large magnetic storm-induced nighttime ionospheric flows at mid-latitudes and their impacts on GPS-based navigation systems // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A00A06. DOI: 10.1029/2008JA013076.

Bergeot N., Bruyninx C., Defraigne P., et al. Impact of the Halloween 2003 ionospheric storms on kinematic GPS positioning in Europe // *GPS Solutions.* 2011. V. 15. P. 171–180. DOI: 10.1007/s10291-010-0181-9.

Dashora N., Sharma S., Dabas R.S., et al. Large enhancements in low latitude total electron content during 15 May 2005 geomagnetic storm in Indian zone // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1803–1820. DOI: 10.5194/angeo-27-1803-2009.

Doherty P.H., Delay S.H., Valladares C.E., Klobuchar J.A. Ionospheric scintillation effects in the equatorial and auroral regions // *Proceedings of International Beacon Satellite Symposium, June 4–6, 2001.* P. 328–333.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // *J. Geodesy.* 2009. V. 83, N 3–4. P. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.

Foster J.C., Rideout W. Mid-latitude TEC enhancements during the October 2005 superstorm // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L12S04. DOI: 10.1029/2004GL021719.

Gurtner W., Estey L. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. 2012. Available at: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/> (accessed June 6, 2015).

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice.* New York; Wien: Springer-Verlag, 1992. 327 p.

Jakowski N., Stankov S.M., Klaehn D. Operational space weather service for GNSS precise positioning // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23. P. 3071–3079.

Jakowski N., Mayer C., Wilken V., Borries C. Ionospheric storms at high and mid-latitudes monitored by ground and space based GPS techniques // *Proceedings of the International Beacon Satellite Symposium, June 11–15, 2007.* 1 CD.

Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at mid-latitude // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 14. P. 1659. DOI: 10.1029/2002GL014770.

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.

Mannucci A.J., Tsurutani B.T., Abdu M.A., et al. Superposed epoch analysis of the dayside ionospheric response to four intense geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A00A02. DOI: 10.1029/2007JA012732.

Mannucci A.J., Crowley G., Tsurutani B.T., et al. Interplanetary magnetic field by control of prompt total electron content increases during superstorms // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 115–116. P. 7–16. DOI: 10.106/j.jastp. 2014.01.001.

Nishioka M., Saito A., Tsugawa T. Super-medium-scale traveling ionospheric disturbance observed at mid-latitude during the geomagnetic storm on 10 November 2004 // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A07310. DOI: 10.1029/2008JA013581.

Ngwira C.M., McKinnell L.-A., Cilliers P.J., Yizangaw E. An investigation of ionospheric disturbances over South Africa during the magnetic storm on 15 May 2005 // *Adv. Space Res.* 2012. V. 49, N 2. P. 327–335. DOI: 10.1016/j.asr.2011.09.035.

Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24, N 18. P. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.

Pi X., Freeman A., Chapman B., et al. Imaging ionospheric inhomogeneities using spaceborne synthetic aperture radar // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A04303. DOI: 10.1029/2010JA016267.

Pi X., Mannucci A.J., Valant-Spraight B., et al. Observations of global and regional ionospheric irregularities and scintillations using GNSS tracking networks // *Proceedings of ION Pacific PNT Conference, Honolulu, Hawaii, 22–25 April 2013.* P. 752–761.

Rama Rao P.V.S., Gopi Krishna S., Vara Prasad J., et al. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 2101–2110.

Skone S., de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance // *Earth Planets Space.* 2000. V. 52. P. 1067–1071.

Skone S., de Jong M. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillations // *Phys. Chem. Earth. Part A.* 2001. V. 26, iss. 6–8. P. 613–621.

Tsurutani B., Mannucci A., Iijima B., et al. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A08302.

Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proc. IEEE.* 1982. V. 70. P. 324–360.

Zhao B., Wan W., Tschu K., et al. Ionosphere disturbances observed throughout South-East Asia of the superstorm of 20–22 November 2003 // *Ibid.* 2008. V. 113. A00A04. DOI: 10.1029/2008JA013054.

URL: <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/> (accessed June 6, 2015).

REFERENCES

Abreu A.J. de, Fagundes P.R., Sahai Y., de Jesus R., Bitencourt J.A., Brunini C., et al. Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A12312. DOI: 10.1029/2010JA015661.

Abreu A.J. de, Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., Bitencourt J.A., Pillat V.G. An investigation of ionospheric F region response in the Brazilian sector to the super geomagnetic storm of May 2005. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 48, no. 7. pp. 1211–1220. DOI: 10.1016/j.asr.2011.05.036.

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. GPS monitoring of the Earth’s upper atmosphere. Irkutsk, 2006. 479 p. (in Russian).

Afraimovich E.L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I., Voyeykov S.V. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals. *Ann. Geophys.* 2002, vol. 45, no. 1, pp. 55–71.

Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Kondakova T.N. Degradation of performance of the navigation GPS system in

geomagnetically disturbed condition. *GPS Solutions*. 2003, vol. 7, iss. 2, pp. 109–119.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Gaymayunov I.F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, no. 6, pp. 964–972. DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.015.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Kosogorov E.A., Yasyukevich Y.V. The mid-latitude field-aligned disturbances and their effects on differential GPS and VLBI. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, no. 10, pp. 1804–1813. DOI: 10.1016/j.asr.2010.06.030.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavriluyuk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Polyakova A.S., Smolkov G.Y., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *J. Space Weather Space Clim.* 2013, vol. 3, A27.

Astafyeva E. Effects of strong IMF B_z southward events on the equatorial and mid-latitude ionosphere. *Ann. Geophys.* 2009a, vol. 27, pp. 1175–1187.

Astafyeva E.I. Dayside ionospheric uplift during strong geomagnetic storms as detected by the CHAMP, SAC-C, TOPEX and Jason-1 satellites. *Adv. Space Res.* 2009b, vol. 43, pp. 1749–1756. DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.036.

Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Kosogorov E.A. Dynamics of total electron content distribution during strong geomagnetic storms. *Adv. Space Res.* 2007, vol. 39, pp. 1313–1317. DOI: 10.1016/j.asr.2007.03.006.

Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Voeykov S.V. Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 41, no. 9, pp. 1459–1462. DOI: 10.1016/j.asr.2007.03.059.

Basu S., Basu S., Rich F.J., et al. Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A08308. DOI: 10.1029/2006JA012192.

Basu S., Basu S., Makela J.J., MacKenzie E., Doherty P., Wright J.W., Rich F., Keskinen M.J., Sheehan R.E., Coster A.J. Large magnetic storm-induced nighttime ionospheric flows at mid-latitudes and their impacts on GPS-based navigation systems. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00A06. DOI: 10.1029/2008JA013076.

Bergeot N., Bruyninx C., Defraigne P., Pireaux S., Legrand J., Pottiaux E., Baire Q. Impact of the Halloween 2003 ionospheric storms on kinematic GPS positioning in Europe. *GPS Solutions*. 2011, vol. 15, pp. 171–180. DOI: 10.1007/s10291-010-0181-9.

Dashora N., Sharma S., Dabas R.S., Alex S., Pandey R. Large enhancements in low latitude total electron content during 15 May 2005 geomagnetic storm in Indian zone. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 1803–1820. DOI: 10.5194/angeo-27-1803-2009.

Doherty P.H., Delay S.H., Valladares C. E., Klobuchar J.A. Ionospheric scintillation effects in the equatorial and auroral regions. *Proc. of International Beacon Satellite Symposium, June 4–6, 2001*, pp. 328–333.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*. 2009, vol. 83, no. 3–4, pp. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.

Foster J.C., Rideout W. Mid-latitude TEC enhancements during the October 2005 superstorm. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L12S04. DOI: 10.1029/2004GL021719.

Gurtner W., Estey L. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. 2012. Available at: <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/> (accessed June 6, 2015).

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Posit-Verlag*, 1992, 327 p.

Jakowski N., Stankov S.M., Klaehn D. Operational space weather service for GNSS precise positioning. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 23, pp. 3071–3079.

Jakowski N., Mayer C., Wilken V., Borries C. Ionospheric storms at high and mid-latitudes monitored by ground and space based GPS techniques. *Proc. of the International Beacon Satellite Symposium, June 11–15, 2007*. 1 CD.

Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. Ionospheric Radio Tomography. Moscow, Nauka Publ., 2007. 335 p. (in Russian).

Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, no. 14, p. 1659. DOI: 10.1029/2002GL014770.

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, vol. 32, L12S02. DOI: 10.1029/2004GL021467.

Mannucci A.J., Tsurutani B.T., Abdu M.A., Gonzalez W.D., Komjathy A., Echer E., Iijima B. A., Crowley G., Anderson D. Superposed epoch analysis of the dayside ionospheric response to four intense geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00A02. DOI: 10.1029/2007JA012732.

Mannucci A.J., Crowley G., Tsurutani B.T., Verkhoglyadova O.P., Komjathy A., Stephens P. Interplanetary magnetic field by control of prompt total electron content increases during superstorms. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 115–116, pp. 7–16. DOI: 10.106/j.jastp.2014.01.001.

Nishioka M., Saito A., Tsugawa T. Super-medium-scale traveling ionospheric disturbance observed at mid-latitude during the geomagnetic storm on 10 November 2004. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A07310. DOI: 10.1029/2008JA013581.

Ngwira C.M., McKinnell L.-A., Cilliers P.J., Yizangaw E. An investigation of ionospheric disturbances over South Africa during the magnetic storm on 15 May 2005. *Adv. Space Res.* 2012, vol. 49, no. 2, pp. 327–335. DOI: 10.1016/j.asr.2011.09.035.

Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophys. Res. Lett.* 1997, vol. 24, no. 18, pp. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.

Pi X., Freeman A., Chapman B., Rosen P., Li Z. Imaging ionospheric inhomogeneities using spaceborne synthetic aperture radar. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A04303. DOI: 10.1029/2010JA016267.

Pi X., Mannucci A.J., Valant-Spraight B., Bar-Sever Y., Romans L.J., Skone S., Sparks L., Martin Hall G. Observations of global and regional ionospheric irregularities and scintillations using GNSS tracking networks. *Proc. ION Pacific PNT Conference, 22–25 April 2013*, pp. 752–761.

Rama Rao P.V.S., Gopi Krishna S., Vara Prasad J., Prasad S.N.V.S., Prasad D.S.V.V.D., Niranjana K. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 2101–2110.

Skone S., de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance. *Earth Planets Space*. 2000, vol. 52, pp. 1067–1071.

Skone S., de Jong M. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillations. *Phys. Chem. Earth. Part A*. 2001, vol. 26, iss. 6–8, pp. 613–621.

Tsurutani B., Mannucci A., Iijima B., Abdu M.A., Sobral J.H.A., Gonzalez W., Guarneri F., Tsuda T., et al. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A08302.

Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proc. IEEE*. 1982, vol. 70, pp. 324–360.

Zhao B., Wan W., Tschu K., Igarashi K., Kikuchi T., Nozaki K. Ionosphere disturbances observed throughout South-East Asia of the superstorm of 20–22 November 2003. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00A04, DOI: 10.1029/2008JA013054.

URL: <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/> (accessed June 6, 2015).