

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2015 г. НА ТОЧНОСТЬ ОДНОЧАСТОТНОГО GPS-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

<sup>1</sup>Е.И. Данильчук, <sup>1,2</sup>Ю.В. Ясюкевич, <sup>2</sup>А.С. Ясюкевич

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
danilchuk.k@mail.ru

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
yasukevich@iszf.irk.ru

## MARCH 17, 2015 GEOMAGNETIC STORM EFFECTS ON GPS SINGLE-FREQUENCY POSITIONING PRECISION

<sup>1</sup>E.I. Danilchuk, <sup>1,2</sup>Yu.V. Yasyukevich, <sup>2</sup>A.S. Yasyukevich

<sup>1</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
danilchuk.k@mail.ru

<sup>2</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
yasukevich@iszf.irk.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние геомагнитной бури 17 марта 2015 г. на точность одночастотного GPS-позиционирования. В работе рассмотрены навигационные данные ГНСС-приемников, расположенных на разных широтах в Американском и Азиатском регионах. Установлено, что влияние геомагнитной бури проявляется в них по-разному. В Американском регионе влияние начинает проявляться во время главной фазы бури и продолжается на некоторых станциях во время фазы восстановления. В Азиатском регионе эффекты, вызванные геомагнитной бурей, ярко выражены во время фазы восстановления, причем эффект отсутствует на приэкваториальных станциях.

**Ключевые слова:** GPS, геомагнитная буря, ошибки позиционирования.

**Abstract.** We study the effect of the March 17, 2015 geomagnetic storm on the GPS single-frequency positioning precision. The study is based on data from GNSS receivers located at different latitudes in the American and Asian regions. We found that in these regions the effect of the geomagnetic storm occurs in different ways. In the American region, the effect starts during the main phase of the storm and continues during the recovery phase at some stations. In the Asian region, the effects caused by the geomagnetic storm are dominant during the recovery phase, and they are not observed at stations located near the equator.

**Keywords:** GPS, geomagnetic storm, positioning errors.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей любой глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) является определение точных координат приемника. Существенным недостатком ГНСС является наличие ошибок позиционирования, возникающих при распространении сигнала от спутника до приемника. Существенный вклад в величины ошибок вносит состояние среды распространения сигнала, в частности, ионосферы. На состояние ионосферы, и, как следствие, значения точности позиционирования влияет космическая погода [Stankov et al., 2006].

Одним из факторов космической погоды, который может вызывать возмущения в области ионосферы, является геомагнитная буря, во время которой происходит глобальное возмущение полного электронного содержания (ПЭС), электронной концентрации в максимуме ионосферного слоя F и высоты максимума. Состояние ионосферы во время магнитных бурь зависит от различных параметров: местного времени, геомагнитной широты, солнечной активности, времени начала бури, интенсивности бури и др. [Благовещенский, 2013; Mendillo, 2006].

Целью данной работы является исследование влияния геомагнитной бури 17 марта 2015 г. на точность GPS-позиционирования.

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В работе использовались данные навигационных приемников сети IGS (International GNSS Service) [Dow et al., 2009], представленные в формате RINEX

(Receiver Independent Exchange Format) [Gurtner, Estey, 2007]. Были рассмотрены две цепочки приемников (рис. 1), расположенных на разных широтах, в Американском (~65° W) и Азиатском (~120° E) секторах.

В работе осуществлялось итерационное решение по данным системы GPS односточечной навигационной задачи в одночастотном режиме с ионосферной коррекцией на основе модели Клобучара [Klobuchar, 1987]. Использовались точные эфемериды спутников (SP3). Маска по углу места спутника составляет 10°. В качестве инструмента решения навигационной задачи использована программа Navi [Затолокин, 2020]. Под точностью позиционирования понимается полная 3D-ошибка  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2},$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  — отклонения измеряемой координаты от истинной в трех направлениях.

Геомагнитная буря 17 марта 2015 г., названная по дню начала бурей Святого Патрика, является одной из самых мощных геомагнитных бурь 24-го солнечного цикла [Astafyeva et al., 2015]. Динамика индекса *SYM/H* (рис. 2, а) характеризуется резким скачком до ~50–70 нТл в 04:45 UT. Во время начальной фазы, продолжавшейся ~1.5 ч, значения *AE*-индекса (рис. 2, б) оставались на уровне ≤100 нТл за исключением момента внезапного начала бури, когда значение *AE* резко изменилось с 52 нТл в 04:45 UT до 269 нТл в 04:47 UT. Главная фаза геомагнитной бури продолжалась ~16.5 ч и характеризовалась

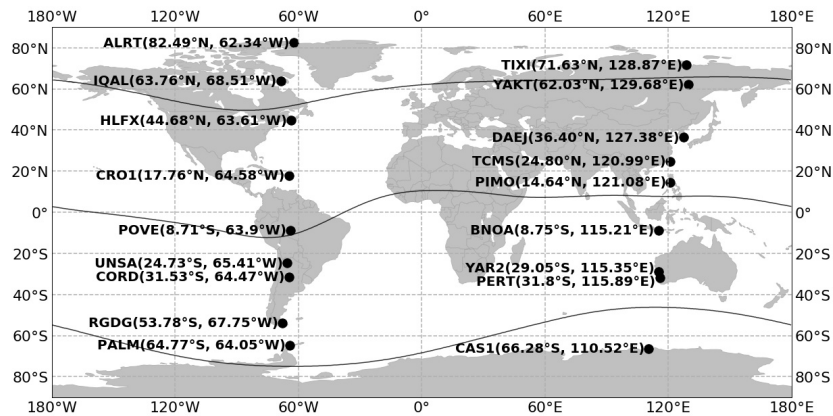


Рис. 1. Расположение GPS-приемников

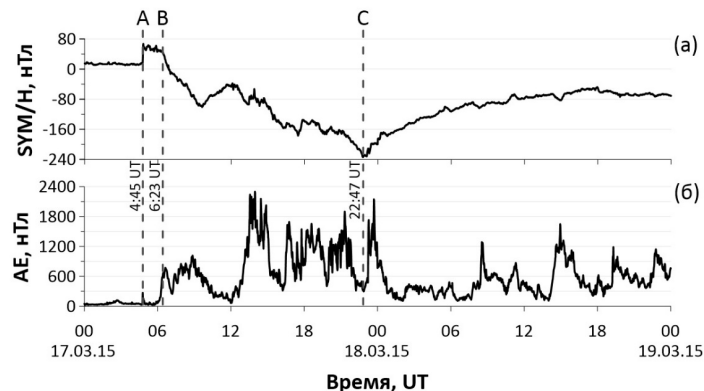


Рис. 2. Индексы  $SYM/H$  (а) и  $AE$  (б) 17–18 марта 2015 г. Вертикальные штриховые линии — внезапное начало бури (А), начало главной фазы (В) и начало фазы восстановления (С)

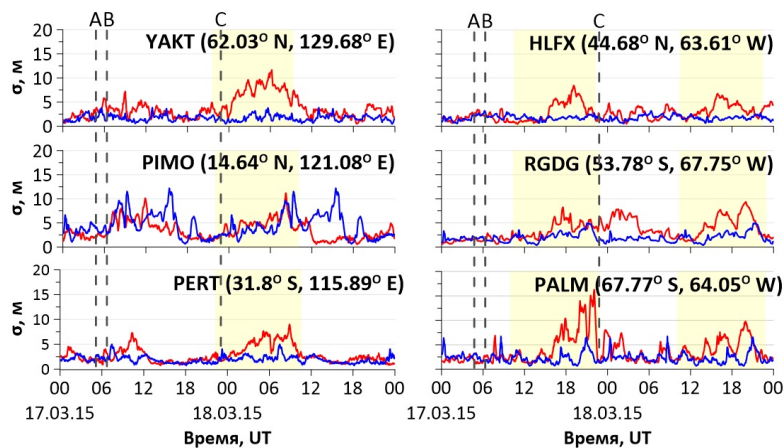


Рис. 3. Динамика 3D-ошибки GPS-позиционирования в Азиатском (YAKT, PIMO, PERT) и Американском (HLFX, RGDG, PALM) секторах 17–18 марта 2015 г. (красные кривые) и в контрольный день 10 марта 2015 г. (синие кривые). Интервалы, выделенные желтым цветом, обозначают дневное время. Вертикальными штриховыми линиями обозначены внезапное начало бури (А), начало главной фазы (В) и фазы восстановления (С)

медленным уменьшением  $SYM/H$  до  $-234$  нТл (в 22:47 UT) и значительной вариабельностью  $AE$  (от 65 до  $\sim 2200$  нТл). После 22:47 UT началась длительная фаза восстановления, продолжавшаяся несколько дней [Полех и др., 2016; Astafyeva et al., 2015].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 показана динамика ошибок позиционирования некоторых приемников Американского и

Азиатского секторов (рис. 1). Все результаты приведены в сравнении со спокойным днем (10 марта 2015 г.).

В Американском регионе влияние бури на точность позиционирования проявляется во время главной фазы, а на некоторых приемниках продолжается и во время фазы восстановления. Причем эффекты, вызванные геомагнитной бурей, проявляются по-разному и по широтам: практически отсутствуют эффекты для высокоширотных станций Северного полушария, в то время как для Южного полу-

шария наблюдается ухудшение точности в 1.5–4 раза относительно контрольного дня. В Азиатском регионе влияние бури на ошибки позиционирования выражены во время фазы восстановления и отсутствуют во время главной фазы в ночное время. На приэкваториальных станциях Азиатского региона эффекты, вызванные бурей, практически не наблюдаются. Это, вероятно, связано с тем, что во время главной фазы в экваториальной области подъем ионизации (и максимальные ошибки) имел место только в гребнях экваториальной аномалии (Американский сектор), а во время фазы восстановления понижение ионизации не сказалось значительно на навигационном решении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных GPS за 17 марта 2015 г. позволил сделать вывод, что влияние геомагнитной бури на точность позиционирования в одночастотном режиме проявляется по-разному в Азиатском и Американском регионах. Вероятнее всего, различие обусловлено локальным временем фаз бури. Принципиальным является различие эффектов бури на станции в одном долготном секторе в разных полушариях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-383010.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенский Д.В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Ч. 1. (Обзор). *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2013. Т. 53, № 3. С. 291–307.

Затолокин Д.А. *Программа решения навигационной задачи ГНСС Navi*. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2020612010, 13 февраля 2020.

Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б. и др. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. Т. 56, № 5. С. 591–605. DOI: [10.7868/S0016794016040179](https://doi.org/10.7868/S0016794016040179).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120, no. 10. P. 9023–9037. DOI: [10.1002/2015JA021629](https://doi.org/10.1002/2015JA021629).

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geodesy*. 2009. Vol. 83. P. 191–198. DOI: [10.1007/s00190.008.0300.3](https://doi.org/10.1007/s00190.008.0300.3).

Gurtner W., Estey L. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2007. URL: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex211.txt>.

Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1987. Vol. 3, no. 3. P. 325–331. DOI: [10.1109/TAES.1987.310829](https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829).

Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006. No. 44, RG4001.

Stankov S.M., Jakowski N., Tsybulya K., Wilken V. Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning. *Radio Sci.* 2006. Vol. 41. RS6S09. DOI: [10.1029/2005RS003327](https://doi.org/10.1029/2005RS003327).