

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.012

ФЛУКТУАЦИИ GPS-СИГНАЛОВ И ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ПОЛЯРНОЙ И АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ В НОЯБРЕ 2012 ГОДА

И.И. Шагимуратов¹, И.И. Ефишов¹, М.В. Филатов², И.Е. Захаренкова¹, Н.Ю. Тепенитцина¹, Г.А. Якимова¹

¹Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия

²ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Апатиты, Россия

E-mail: shagimuratov@mail.ru

Аннотация

В работе дано сопоставление проявления фазовых флуктуаций GPS-сигналов и их воздействия на точность позиционирования на полярной NYA1 и авроральной TRO1 станциях для ноября 2012г. Представлен детальный анализ особенностей и различий ионосферных эффектов на обсуждаемых станциях во время конкретных геофизических условий.

Введение

Флуктуации GPS/ГЛОНАСС сигналов в высоких широтах обусловлены присутствием в ионосфере различных масштабов неоднородностей. Интенсивность и частота появления флуктуаций существенно усиливаются во время геомагнитных возмущений. Ионосферные неоднородности структурированы по широте, и характер их проявления соответствует динамике таких структур, как авроральный овал, касп, полярная шапка. Особый интерес к исследованиям флуктуаций обусловлен тем, что они являются одним из основных факторов, влияющих на функционирование космических навигационных систем в Арктике. В последнее время много работ посвящено проявлению фазовых GPS-флуктуаций в различных областях ионосферы [Cherniak et al., 2015; Prikryl et al., 2015]. Чаще всего фазовые флуктуации трансionoсферных сигналов наблюдаются в районе магнитного полудня и в районе магнитной полуночи. Особенно сильные флуктуации, ассоциируемые с авроральными возмущениями, регистрируются в авроральном овале [Черноус и др., 2015]. Интенсивные фазовые флуктуации GPS-сигналов, вызванные авроральными возмущениями, существенно ухудшают точность навигационных измерений [Jacobsen and Dähmn, 2014; Yang et al., 2019]. При этом по сравнению со спокойными условиями ошибки позиционирования могут увеличиваться более чем на порядок. Флуктуации вызывают скачки фазы сигналов (cycle slips) и могут приводить к потере слежения принимаемых сигналов, что в конечном итоге ухудшает точность навигационных измерений [Shagimuratov et al., 2018]. По комплексным наблюдениям станции NY-Alesund проведены исследования проявления флуктуаций в полярной ионосфере, обусловленных полярными патчами (polar cap patches) и полярными суббуриями [Jin et al., 2014; Belakhovsky et al., 2020]. В работе [Belakhovsky et al., 2021] представлен анализ влияния различных типов возмущений в полярной ионосфере на навигационные сигналы. Исследования касаются проявления фазовых и амплитудных скинтилляций, обусловленных дневными высыпаниями в каспе, высыпаниями во время суббуриевой активности в полярной ионосфере, а также вызванных влиянием полярных патчей. В данной работе по GPS-наблюдениям по станциям NYA1 и TRO1 представлена детальная картина проявления фазовых флуктуаций и ошибок позиционирования во время конкретных геофизических условий.

1. Данные

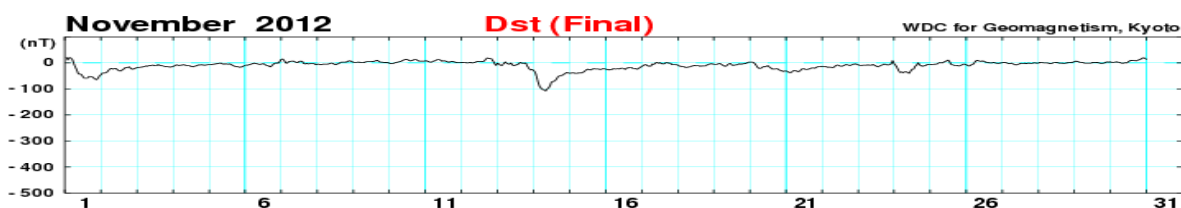


Рисунок 1. Dst за ноябрь 2012 года.

В работе использовались GPS наблюдения полярной NYA1 и авроральной TRO1 станций за интервал 11-14 ноября 2012 г. и данные сети магнитометров IMAGE (<http://www.space.fmi.fi/IMAGE>). В качестве меры флуктуационной активности использовался параметр ROT (Rate of TEC) на 1 мин. интервале. В качестве единицы измерения TEC используется TECU (1 TECU соответствует 10^{16} эл/м²). Геомагнитные условия (рис. 1) включали умеренную бурю 14 ноября, минимальная величина Dst достигало -108 нТ в 00:08 UT. Максимальная авроральная активность 14 ноября 2012 г. приходилась на 00-10 UT.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Событие 11 ноября 2012 года

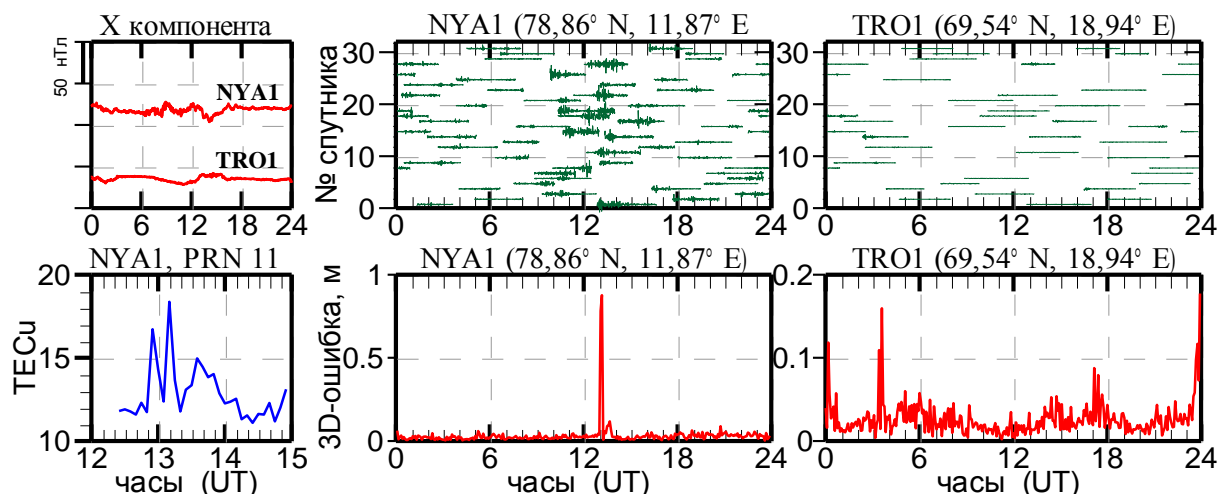


Рисунок 2. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовой интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

Вариации магнитного поля на обеих станциях по данным сети IMAGE показывают, что 11 ноября был спокойным днем. Слабое возмущение на станции NYA1 регистрировалось в районе 08-16 UT. На этом интервале наблюдалось усиление фазовых флуктуаций (ROT) на всех спутниковых пролетах над станцией NYA1, которая в этот период располагалась в районе Каспа. На авроральной станции TRO1 флуктуации были очень слабыми (на уровне фона). Как видно на рисунке 2, для спутника №11 наблюдались TEC вариации в виде всплесков повышенной ионизации, которые можно интерпретировать как проявление «патч» структур. Амплитуда всплесков достигала фактора 1,5 относительно фона. Для оценки влияния фазовых флуктуаций на ошибки позиционирования был использован алгоритм высокоточного позиционирования для конкретной станции, получивший название Precise Point Positioning (PPP). Метод основан на стратегии обработки GPS-наблюдений одного приемника и позволяет эффективно определять с высокой точностью координаты потребителя. Для расчета ошибок использовалась программа GIPSY (<http://apps.gdgps.net>), 3D-ошибки позиционирования определялись как детрендированные координаты от средних значений (x_0 , y_0 , z_0) на каждую эпоху:

$$P_{3D}(i) = \sqrt{(x(i) - x_0)^2 + (y(i) - y_0)^2 + (z(i) - z_0)^2}.$$

Ошибки по станции TRO1 не превышали 15 см. По станции NYA1 максимальная ошибка составляла около 1 м и регистрировалась в районе 13 UT. Характерно, что наблюдается явное временное соответствие между флуктуациями и ошибками позиционирования.

2.2. Событие 12 ноября 2012 года

Вариации магнитного поля на обеих станциях по данным сети IMAGE показывают, что на станции NYA1 наблюдалась небольшая положительная бухта после 21 UT. На авроральных станциях после 20 UT регистрировалось интенсивная суббуревая активность. На станции TRO1 именно на этот период пришлось интенсивные фазовые флуктуации. Интересно, что в это же время на станции NYA1 также наблюдались сильные флуктуации. Небольшое усиление флуктуаций наблюдалось в дневное время. Флуктуационную активность после 20 UT мы можем ассоциировать с проявлением патч структур, которые наблюдались в вариациях TEC (как пример) на пролете спутника №8, когда флуктуации в три раза превышали относительно фона. На обеих станциях ошибки позиционирования регистрировались приблизительно в одно и то же, вечернее время. По станции TRO1 ошибки были более чем в два раза больше, чем на NYA1.

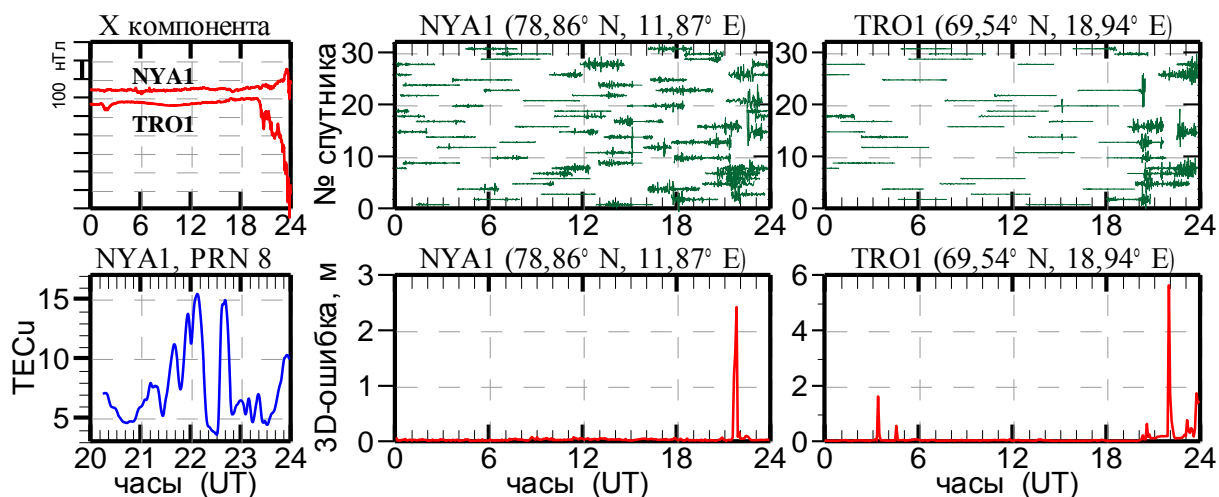


Рисунок 3. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовой интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

2.3. Событие 13 ноября 2012 года

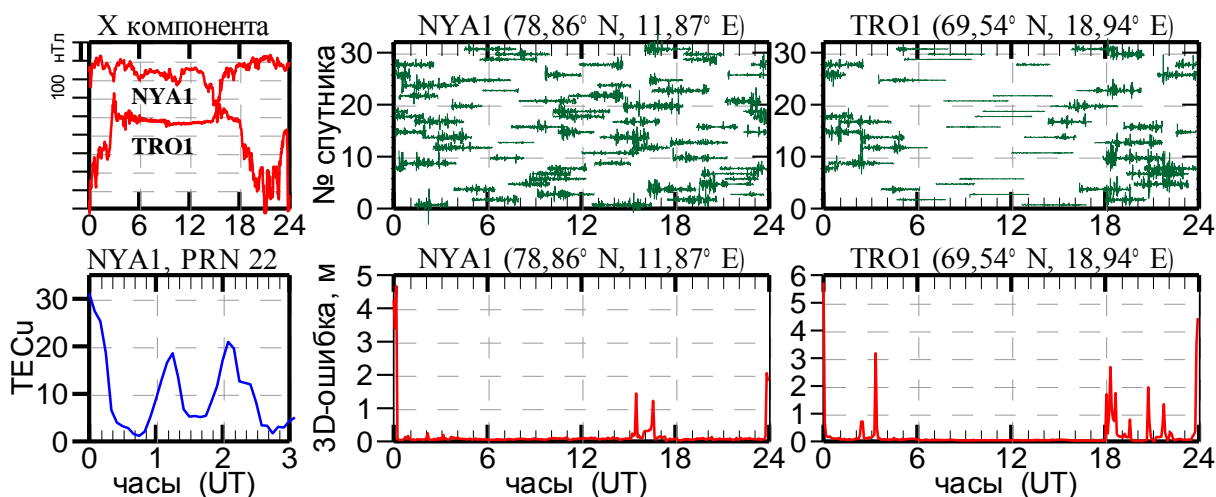


Рисунок 4. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовой интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

По данным сети IMAGE (рис. 4) на станции NYA1 в послеполуденное время наблюдалась суббуря умеренной интенсивности. На станции TRO1 регистрировались суббури в утреннем и вечернем секторах. По интенсивности вечерняя суббуря превышала утреннюю. На станции TRO1 на эти периоды приходилось усиление фазовых флуктуаций, причем амплитуда была больше в вечернее время. На станции NYA1 также наблюдалось усиление флуктуаций в эти периоды. Усиление флуктуаций хорошо соотносилось с временным периодом, когда наблюдалась суббурия. Поведение ошибок позиционирования в целом хорошо согласуется с проявлением фазовых флуктуаций сигналов GPS. В то же время на станции NYA1 максимальная ошибка приходилась на утренние часы. Это можно объяснить проявлением патч структур (см. вариации TEC для спутника №22) в фазовых флуктуациях и их влиянием на ошибки позиционирования.

2.4. Событие 14 ноября 2012 года

По данным сети IMAGE видно, что на станции NYA1 в послеполуденное время наблюдалась суббурия малой интенсивности. На станции TRO1 регистрировались интенсивные флуктуации магнитного поля в утренние часы. В конечном итоге это привело к очень большим ошибкам позиционирования. На станции NYA1 слабые флуктуации наблюдались в течение всех суток. Ошибки малой величины регистрировались в околополуденное время.

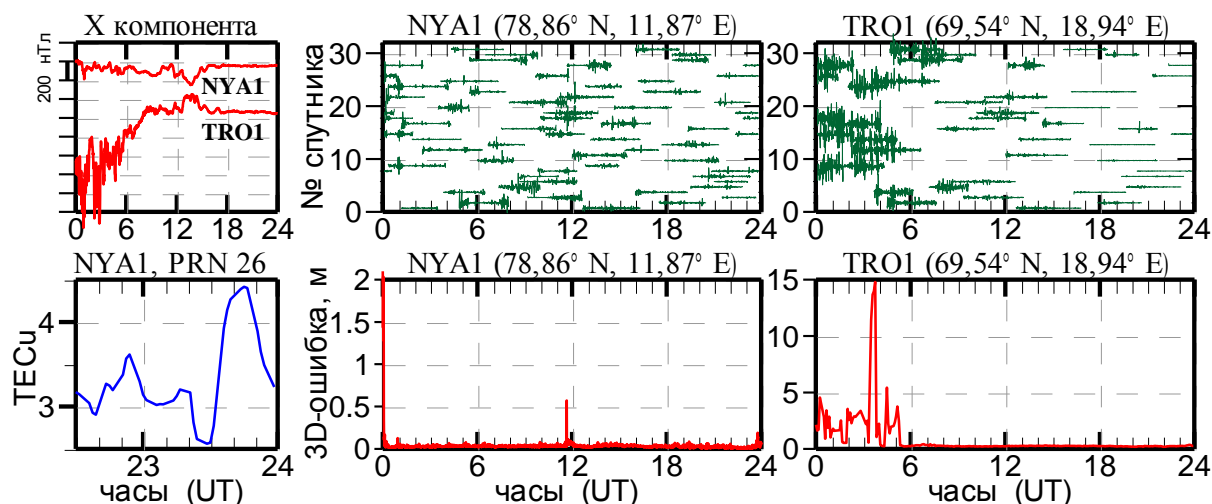


Рисунок 5. Магнитограммы и вариации ROT по всем пролетам спутников за 24 часовый интервал по станциям NYA1 и TRO1 (верхняя панель); TEC вдоль пролета спутника и ошибки позиционирования (нижняя панель).

Заключение

Проведен детальный анализ проявления флуктуационной активности и ошибок позиционирования на полярной NYA1 и авроральной TRO1 станциях на интервале 11-14 ноября 2012 г. За этот период регистрировались различного характера геомагнитные возмущения. По станции TRO1 как флуктуации, так и ошибки позиционирования хорошо согласуется с временным развитием авроральной и суббуревой активности. Проявления флуктуационной активности по станции NYA1 носит достаточно сложный характер. Наблюдается связь флуктуаций как с полярными суббурями, так и полярными патчами. Можно предположить, что это обусловлено зависимостью от геомагнитной возмущённости положения станции в каспе или в авроральной ионосфере. В общем, ошибки позиционирования по NYA1 меньше, чем по станции TRO1.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ: грант № 19-05-00570.

Литература

- Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. (2015). Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances. *Sun and Geosphere*, 13/1, 89-94.
- Черноус С.А., Швец М.В., Филатов М.В., и др. (2015). Исследования особенностей навигационных сигналов в периоды авроральных возмущений. *Химическая физика*, 34(10), 33-39.
- Prikryl P., Jayachandran P.T., Chadwick R., Kelly T.D. (2015). Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013. *Ann. Geophys.*, 33, 531–545. DOI: 10.5194/angeo-33-531-2015
- Cherniak Yi., Zakharenkova I. (2015). Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: A case study of 17 March 2015 geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 151. DOI: 10.1186/s40623-015-0316-x
- Jin Y., Moen J., Miloch W. (2014). GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: direct comparison. *J. Space Weather Space clim.*, 4, A23. DOI: 10.1051/swsc/2014019
- Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. (2021). Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes. *Ann. Geophys.*, 39, 687–700. DOI: 10.5194/angeo-39-687-2021
- Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. (2020). Influence of the substorm precipitation and polar cap patches on GPS signals at high latitudes. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 17, 6, 139-144. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-139-144
- Jin Y., Moen I., Oksavik K., Spicher A. (2017). GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches. *J. Space Weather Space Clim.*, 7, A23. DOI: 10.1051/swsc/2017022
- Yang Z., Jade Morton Y.T., Zakharenkova I. (2019). Global view of ionospheric disturbance impacts on kinematic GPS positioning solutions during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. of Geophysical Research: Space Physics*, DOI: 10.1029/2019JA027681
- Jacobsen K.S., Dähnn M. (2014). Statistics of ionospheric disturbances and their correlation with GNSS positioning errors at high latitudes. *J. Space Weather Space Clim.*, 4, A27. DOI: 10.1051/swsc/2014024