

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.030

ПРОЯВЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В АВРОРАЛЬНОЙ И ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ В МАКСИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И.И. Шагимуратов¹, М.В. Филатов², И.И. Ефишов¹, Н.Ю. Тепеницына¹, Г.А. Якимова¹

¹Калининградский филиал ФБГУ, ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия; e-mail: shagimuratov@mail.ru

²ФБГУ, Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты анализа проявления фазовых флуктуаций GPS сигналов по станциям Ny-Ålesund (78,9°N, 11,9°E) и Tromsø (69,60°N, 19,20°E) в максимуме солнечной активности для марта, июня, октября и декабря 2015 года. В суточном распределении максимум флуктуаций по станции Ny-Ålesund для всех месяцев, за исключением декабря, наблюдается около магнитного полудня, а по станции Tromsø около полуночи. В декабре по станции Ny-Ålesund максимум проявления флуктуаций смещается к вечерним часам.

Введение

Известно, что трансionoсферные сигналы подвержены флуктуациям/сцинтилляциям амплитуды и фазы (амплитудные, фазовые флуктуации) [1]. Флуктуации GPS сигналов обусловлены присутствием в ионосфере неоднородностей различных масштабов. Флуктуации зависят от широты, солнечной и геомагнитной активности, местного времени [2]. Неоднородности структурированы по широте в соответствии с разделением высокоширотной ионосферы на субавроральную, авроральную, полярную шапку, касп. Высоочастотные (быстрые) флуктуации, носящие название сцинтилляций, обусловлены дифракцией сигналов на мелкомасштабных неоднородностях, размеры которых сравнимы с зоной Френеля. Низкочастотные (медленные) флуктуации обусловлены рефракцией сигнала на крупномасштабных неоднородностях размерами более 300 м [1]. Медленные флуктуации, характеризуют флуктуации полного электронного содержания (TEC - Total Electron Content) вдоль луча спутник-приемник. На высоких широтах доминирующими являются фазовые флуктуации/сцинтилляции [3, 4]. В качестве меры интенсивности фазовых сцинтилляций широко используется индекс ROTI. Стандартные измерения позволяют получать данные о TEC с 30 сек. интервалом. Наиболее широко используемым индикатором флуктуационной активности является параметр ROT (Rate Of TEC), и индекс интенсивности флуктуаций ROTI [5]. Индекс позволяет детектировать наличие ионосферных неоднородностей. В полярной области (78-82° магнитной широты) интенсивные флуктуации ассоциируются с полярными пятнами повышенной ионизации (polar patches), высыпаниями частиц в авроральном овале и каспе [6-8]. В авроральной области фазовые флуктуации обычно наблюдаются в периоды авроральных возмущений вблизи местной магнитной полуночи и тесно связаны с динамикой аврорального овала [9]. В работе [10] показано, что при прохождении сигналов через области дискретных форм полярных сияний интенсивность флуктуаций, существенно увеличиваются. В настоящее время сезонные проявления флуктуаций мало представлены в литературе. По GPS наблюдениям канадской сети высокоширотных станций анализ сезонных проявлений флуктуаций за период 2008-2013 гг. представлен в работе [4], для европейского сектора за период 2010-2017 гг. по станции Ny-Ålesund в работе [11].

В рассматриваемой работе представлены анализ сезонных проявления фазовых флуктуациях в авроральной и полярной ионосфере в максимуме солнечной активности. В качестве меры интенсивности фазовых флуктуациях использовался индекс ROTI.

Материалы

В качестве исходных данных служили стандартные 30 сек. двухчастотные GPS измерения. Привлекались GPS наблюдения полярной станции Ny-Ålesund (NYA1) и авроральной станции Tromsø (TRO1). Для оценки флуктуационной активности рассчитывался индекс ROTI. Единица измерения ROTI — TECU/мин: $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электрон/м}^2$. На основе этих данных для каждого месяца формировалась зависимость индекса от времени суток для обеих станций.

Результаты и обсуждение

Известно, что во время магнитных бурь существенно увеличиваются вероятность проявления флуктуаций и их интенсивность. Анализ эффектов бурь показал, что проявление флуктуаций навигационных сигналов

является индивидуальными для каждой бури. Для корректного анализа сезонных эффектов мы исключали из рассмотрения наиболее возмущенные дни. Следует отметить, что число дней, соответствующих сильным возмущениям, не превышало 5-10% общего количества случаев.

Эффекты в полярной ионосфере

На рис. 1 показано суточное распределение интенсивности фазовых флуктуаций (ROTI) по станции NYA1 для разных месяцев. При этом исключались данные, которые приходились на геомагнитные бури. Индекс ROTI рассчитывался день за днем в течение каждого месяца. Количество данных составляло около 8000 для каждого рассматриваемого периода. Здесь показано суточное поведение ROTI интенсивностью более 0,25 TECU/мин. Значение ROTI меньшей этой величины (слабые флуктуации) не зависят от времени суток.

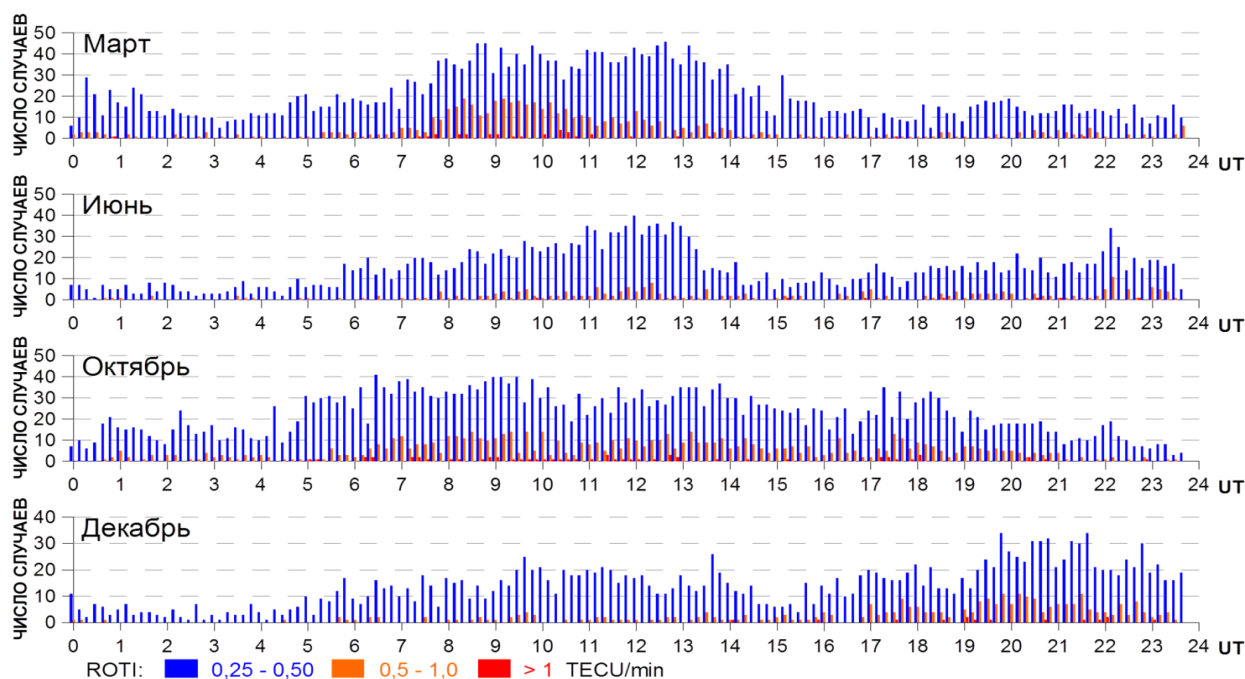


Рисунок 1. Сезонно/суточное проявление интенсивности флуктуаций (ROTI) для рассматриваемых месяцев по станции NYA1.

Станция Ny-Ålesund обеспечивает мониторинг ионосферы в радиусе около 600 км в широтном диапазоне 78-82° магнитной широты [3]. Проявления флуктуаций на этой станции ассоциируются с каспом, полярной шапкой, авроральным овалом [2]. Фазовые флуктуации часто наблюдаются на дневной стороне каспа на магнитных широтах 73.5-80° в интервале 09-15 MLT (06-12 UT), на полярной шапке на широтах выше 75° за исключением каспа, в области аврорального овала на широтах 65-75° в интервале 19-02 MLT [4].

Как следует из рисунка 1, в основном максимум проявления флуктуаций по станции Ny-Ålesund приходится на дневное время (около магнитного полудня), за исключением декабря. Обычно, слабые флуктуации ($ROTI < 0.1-0.25$ TECU/мин) наблюдаются в любое время суток (не показано на рисунке). В марте просматривается четкий максимум в поведении интенсивности флуктуаций, вероятность проявления более интенсивных флуктуаций ($ROTI$ выше 0.5 TECU/мин) приходится на время около 07-14 UT. Полученные результаты согласуются с данными работы [2]. Для июня в суточном распределении флуктуаций наблюдается похожее поведение. Существенно, что вероятность проявления сильных флуктуаций в июне более чем в 1,5-2 два раза меньше, чем в равноденствии (рис. 1). В октябре дневной максимум в проявлении флуктуаций сохраняется, но менее выражен по сравнению с мартом и продлевается до вечерних часов в части интенсивных флуктуаций. В целом, в марте и октябре наблюдается подобие в суточном распределении проявления флуктуаций, в части преобладания дневных флуктуаций.

В декабре суточное распределение фазовых флуктуаций претерпевает существенное изменение. Известно, что максимум проявления флуктуаций зимой обычно приходится на магнитный полдень, исключением является максимум солнечной активности. Из рисунка 1 следует, что для декабря дневной максимум менее выражен, в тоже время интенсивность и вероятность флуктуаций хорошо проявляется в вечернее время.

Относительно такого сезонного поведения флуктуаций можно сделать следующее пояснение. В полярной области наблюдаются различные виды возмущений, с которыми могут ассоциироваться флуктуации. Чаще всего интенсивные флуктуации ассоциируются с полярными пятнами (пятна повышенной ионизации), полярными суббуриями [8]. Анализ данных магнитометров сети «image» (<http://space.fmi.fi/image>) по станции

Ny-Ålesund показал, что в 30% случаев в декабре 2015 г. регистрировались полярные суббури после 16-18 UT, что существенно больше, чем для марта. Дополнительно к этому можно указать следующее замечание. Степень проявления флуктуаций зависит от уровня солнечной активности: высокая в максимуме и более низкая в минимуме [2]. В декабре солнечная активность по отношению к марту уменьшилась почти в два раза (www.swpc.noaa.gov). Мы проанализировали результаты данных, представленных в работе [12], и выявили, что количественное проявление дневных флуктуаций в ноябре и декабре 2015 г снизилось к мартовскому почти в 3 раза. В то время как для ночных, это соотношение практически не изменилось. Это сказалось на соотношении степени дневного и вечернего проявления флуктуаций. Вероятно, с этими факторами связано наблюдаемое в суточном распределении усиление интенсивности флуктуаций на станции NYA1 для декабря в вечернее время.

Эффекты флуктуаций в авроральной ионосфере

На рис. 2 представлено проявление фазовых флуктуаций на станции TRO1 для рассматриваемых периодов. С учетом положения станции, диапазона широт обзора GPS спутниками и экваториальной границы положения аврорального овала, станция TRO1 в ночном секторе чаще находится в области аврорального овала. Флуктуации навигационных сигналов в этой области ассоциируются с авроральной возмущенностью, высыпаниями энергичных частиц, полярными сияниями и тесно связаны с динамикой аврорального овала [8-10].

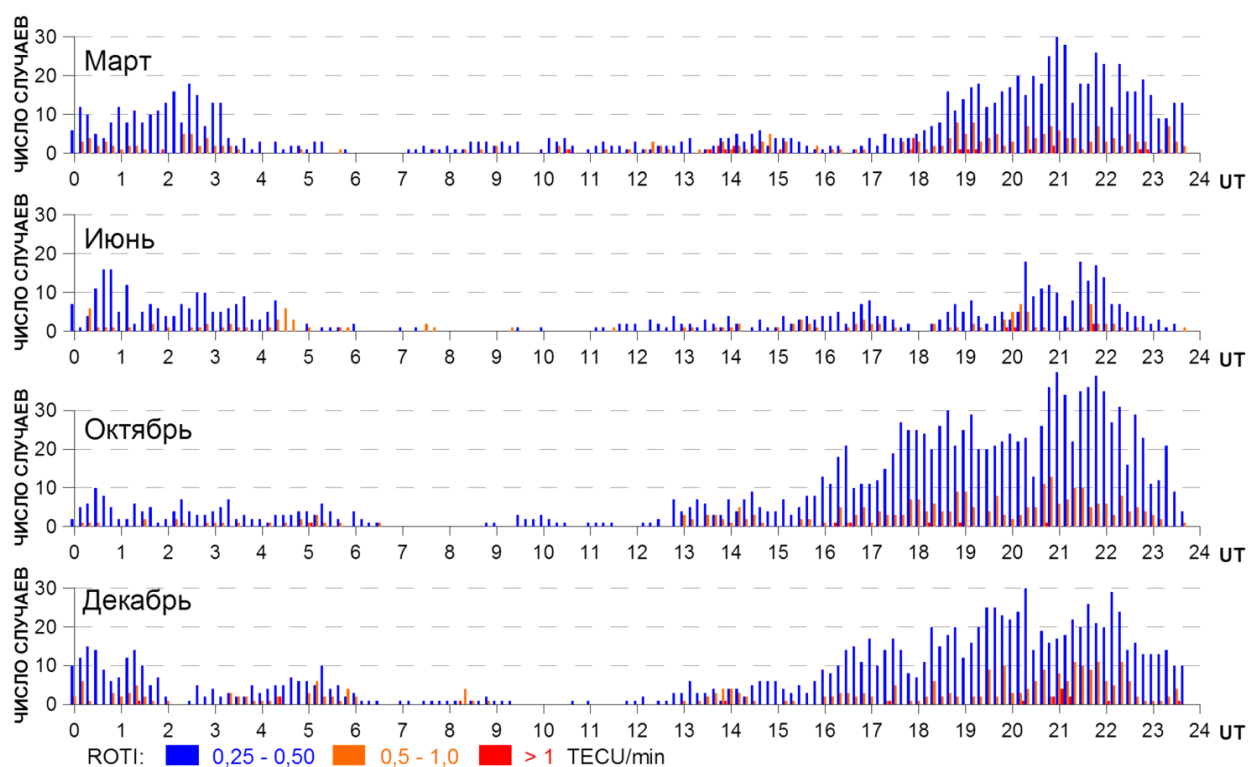


Рисунок 2. Сезонно/суточное проявление флуктуаций по станции TRO1.

Для всех сезонов проявление флуктуаций и их интенсивность наблюдаются в районе магнитной полуночи. Минимальная флуктуационная активность, также как для Ny-Ålesund, наблюдается в июне. Особенно это характерно для сильных ($ROTI > 0,5$ TECU/мин. Минимальная флуктуационная активность наблюдается в июне. Вероятность проявления флуктуаций в июне в два с лишним раза меньше чем в марте. В сезонном проявлении фазовых флуктуаций максимум приходится на март и октябрь. В декабре флуктуационная активность, (в части сильных флуктуаций) в целом, наблюдалась выше, чем в марте период равноденствий. Особенно это проявляется для более интенсивных флуктуаций. Временной интервал проявления флуктуаций расширился в сторону более ранних часов.

Заключение

В работе представлен анализ особенностей проявления фазовых флуктуаций GPS сигналов в полярной и авроральной ионосфере в максимуме солнечной активности. В качестве исходных данных использованы GPS наблюдения станций NYA1 (76,6°N MLAT) и TRO1 (66,73°N MLAT). Активность флуктуаций оценивалась

индексом ROTI. В целом, максимальная активность флуктуаций по станции NYA1 приходилась на дневные часы (8-13 UT), с максимумом в марте. В декабре суточное распределение фазовых флуктуаций претерпевает существенное изменение. Дневной максимум менее выражен, в тоже время интенсивность и вероятность флуктуаций хорошо проявлялась в вечернее время. Такая особенность сезонного поведения фазовых флуктуаций свидетельствует о том, что в полярной ионосфере флуктуации могут быть обусловлены различными типами возмущений [8 и ссылки, цитируемые в работе]. По станции TRO1 флуктуации обычно регистрировались в районе магнитной полуночи. Низкая активность на обеих станциях регистрировалась в июне.

Список литературы

1. Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula. E.R. GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather*. 2007. V. 5 (9). S09003. DOI: 10.1029/2006SW000260.
2. Franceschi G., Spogli L., Alfonsi L. et al. The ionospheric irregularities climatology over Svalbard from solar cycle 23 // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. P. 9232. DOI: 10.1038/s41598-019-44829-5
3. Spogli L., Alfonsi L., de Franceschi G. et al. Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 3429. DOI: 10.5194/angeo-27-329-2009
4. Prikryl P, Jayachandran P.T., Chadwick R. et al. Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013 // *Ann. Geophys.* 2015. V. 33. P. 531. DOI: 10.5194/angeo-33-531-2015
5. Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // *Geophys. Res. Letters*. 1997. V. 24 (18). P. 2283. DOI: 10.1029/97GL02273
6. Jin Y., Moen J.I., Oksavik K. et al. GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7 (A23). DOI: 10.1051/swsc/2017022
7. Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbance // *Sun and Geosphere*. 2018. V. 13. P. 89. DOI: 10.31401/SunGeo.2018.01.12
8. Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes // *Ann. Geophys.* 2021. V. 39. P. 687. DOI: 10.5194/angeo-39-687-2021
9. Черноус С.А., Филатов М.В., Шагмуратов И.И. и др. Авроральные возмущения как индикатор воздействия ионосферы на навигационные сигналы // *Хим. физика*. 2018. Т. 37. № 5. С. 77. DOI: 10.7868/S0207401X18050102
10. Шагмуратов И.И., Филатов М.В., Ефшиов И.И. и др. Флуктуации полного электронного содержания и ошибки GPS позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 года // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2021. Т. 85. № 3. С. 433. DOI: 10.31857/S036767652103025X
11. Jin Y, Miloch W.J., Moen J.I., Clausen B.N. Solar cycle and seasonal variations of the GPS phase scintillations at high latitudes // *J. Space Weather Space Clim.* 2018. V. 8 (A48). DOI: 10.1051/swsc/2018034