

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.013

## ВЫСОКОШИРОТНЫЕ СЦИНТИЛЛЯЦИИ GPS СИГНАЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ДОЛГОТАХ ВО ВРЕМЯ БУРИ 7 НОЯБРЯ 2022 ГОДА

И.И. Шагмуратов<sup>1</sup>, И.И. Ефишов<sup>1</sup>, М.В. Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

**Аннотация.** В работе представлен анализ особенностей проявления ТЕС-флуктуаций в высокоширотной ионосфере на различных долготах во время геомагнитной бури 7 ноября 2022 г. Найдено, что развитие флуктуаций на разных долготах весьма похоже и происходит в соответствии с геомагнитной активностью и динамикой аврорального овала, как с его широтным положением, так и его интенсивностью. Наиболее интенсивные ионосферные неоднородности были зарегистрированы в авроральной зоне и на широтах выше 80°N, которые нами были ассоциированы с проявлением языка ионизации (ТОИ).

### Введение

Ионосферные неоднородности различных масштабов на высоких широтах обуславливают флуктуации/сцинтилляции амплитуды и фазы (амплитудные, фазовые флуктуации) навигационных сигналов [Kintner et al., 2007]. На высоких широтах доминирующими являются фазовые флуктуации/сцинтилляции. Флуктуации могут вызывать сбои навигационных сигналов, срывы, скачки фазы и в конечном итоге могут приводить к нарушениям работы навигационных систем [Fabro et al., 2021; Follestad et al., 2021; Шагмуратов и др., 2022]. Неоднородности структурированы по широте в соответствии с разделением высокоширотной ионосферы на субавроральную, авроральную, полярную шапку, касп. Высокочастотные (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 [Kintner et al., 2007]. Медленные флуктуации характеризуют флуктуации полного электронного содержания (ТЕС — Total Electron Content) вдоль луча спутник – приемник.

В настоящее время в мире насчитывается большое количество станций, обеспечивающих регулярные стандартные GPS/ГЛОНАСС-наблюдения, доступные для всех пользователей. Стандартные измерения позволяют получать данные о ТЕС с 30 сек интервалом. Наиболее широко используемым индикатором флуктуационной активности являются параметр ROT (Rate of TEC change) и индекс интенсивности флуктуаций ROTI. Индекс позволяет детектировать наличие ионосферных неоднородностей [Захаренкова и др., 2018, Makareivich et al., 2021]. Доступность, широкое повсеместное использование стандартных 30 сек измерений во многом определило его использование в рассматриваемой работе.

В высокоширотной ионосфере интенсивные флуктуации ассоциируются с полярными пятнами повышенной ионизации (polar patches), выпадениями частиц в авроральном овале и каспе [Belakhovsky et al., 2021; Белаховский и др., 2022, 2023; Шагмуратов и др., 2022]. В авроральной области фазовые флуктуации обычно наблюдаются в периоды авроральных возмущений вблизи местной магнитной полуночи и тесно связаны с динамикой аврорального овала [Черноус и др., 2018]. В работе [Шагмуратов и др., 2021] показано, что при прохождении сигналов через области дискретных форм полярных сияний интенсивность флуктуаций и, соответственно, ошибки позиционирования существенно увеличиваются. Дискретные сияния характеризуются большой динамикой. На коротком интервале времени положение и форма сияний может существенно изменяться, что влияет на величину и динамику ошибок.

В рассматриваемой работе представлен анализ особенностей проявлений фазовых флуктуаций в авроральной и полярной ионосфере на долготах Европы, Гренландии и Аляски. Проведено сопоставление динамики аврорального овала с флуктуационной активностью GPS-сигналов на авроральных широтах.

## Данные и метод

Для анализа широтно-долготных вариаций ионосферных неоднородностей привлекались регулярные наблюдения GPS-станций Европы, Гренландии и Аляски. В европейском секторе использовались станции, расположенные на долготе около 20°E в диапазоне широт 79°-60°N (геомагнитные широты: 76°-58° MLAT). Сеть Гренландии в большей части включает полярные станции, расположенные в каспе и полярной шапке. На долготах Аляски станции расположены в диапазоне широт 71°-59°N, (70°-57° MLAT). Каждая станция поставляет измерения с 30 сек интервалом (стандартные наблюдения). Доступность, широкое повсеместное использование стандартных 30 сек измерений во многом определило его использование в рассматриваемой работе. В качестве индикатора неоднородностей использовались индексы ROT/ROTI. Индекс ROT представляет собой скорость изменения значений TEC и используется как мера оценки активности фазовых флуктуаций. Индекс ROTI (Rate of TEC Index) представляет собой стандартное отклонение значений ROT на определенном временном интервале. Индекс ROTI характеризует интенсивность фазовых флуктуаций GPS-сигналов. Основы метода оценки TEC флуктуаций представлены в работе [Захаренкова и др., 2018].

Основные характеристики геомагнитной бури 7 ноября 2022 г. представлены на рис. 1.

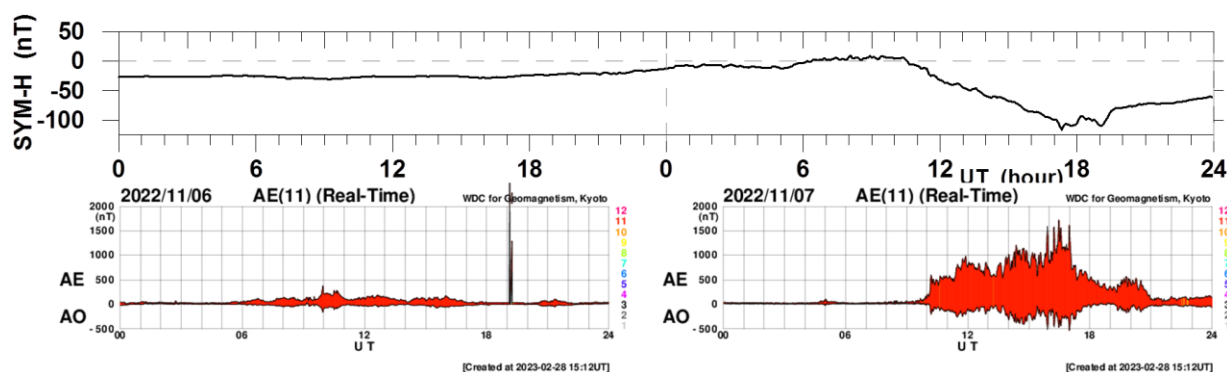


Рисунок 1. Геомагнитная обстановка 6 и 7 ноября 2022 года.

## Широтное проявление флуктуаций

На рисунке 2 представлены вариации индекса ROT для всех спутников, наблюдаемых над станцией наблюдения, и интенсивность флуктуаций (ROTI) в координатах MLAT-UT (круги). Показаны флуктуации на полярных, авроральных и субавроральных станциях, расположенных на долготах Европы и Аляски. В целом поведение флуктуаций на разных долготах похоже и соответствует их геомагнитному расположению. Различие проявляется на полярных станциях NYA1 и SG27. Станция NYA1 (MLAT, 75°N), по-видимому, для данных геофизических условий, находилась в области каспа, в то время как SG27 (MLAT, 70°N) ближе к полярной границе аврорального овала. Флуктуации на полярных широтах отражают проявление дневных высыпаний [Белаховский и др., 2022], проявление флуктуаций на SG27 похоже на поведение флуктуаций на авроральной станции AB27. Интенсивность флуктуаций уменьшается с понижением широты. Экваториальная граница проявления флуктуаций на обеих долготах приходится на широты 57-59°N магнитной широты. Интересно, что по времени начала и окончания развития флуктуаций на разных долготах наблюдается сдвиг по времени около 3<sup>x</sup> часов. Полагаем, что это обусловлено особенностями развития рассматриваемой магнитной бури.

## Проявление флуктуаций на долготах Гренландии

На рисунке 3 представлены вариации ROT на отдельных станциях Гренландии. Станция JWLF (MLAT85N) находится в полярной ионосфере, где часто, во время геомагнитных бурь, наблюдается крупномасштабная структура – язык ионизации (TOI – tongue of ionization). Язык характеризуется как область повышенной ионизации, которая в результате конвекции перемещается с дневной среднеширотной ионосферы через касп в полярную шапку [Шагимуратов и др., 2024]. Язык явно проявляется в измерениях TEC на высокоширотных станциях. Наши исследования показали (работа в печати), что во время бури язык регистрировался над Гренландией в 14-16 UT. В окрестности языка могут формироваться различных масштабов ионосферные неоднородности, которые приводят к TEC флуктуациям навигационных сигналов в полярной ионосфере [Meeren et al., 2015]. На станции JWLF интенсивные флуктуации наблюдаются в окрестности 15 UT. Станции RINK(MLAT) и SENU (MLAT64°N) расположены в области аврорального овала. В широтном поведении

ROTI выделяются два максимума области овала и более интенсивный на широтах около 85-88°N в области зыбка ионизации.

### Долготное проявление ТЕС флуктуаций и динамика аврорального овала

Анализ широтного проявления флуктуаций показал, что наиболее ярко флуктуации наблюдаются на станциях, расположенных на авроральных широтах. На рисунке 4а показаны вариации ROT на всех пролетах спутников на авроральных станциях VARS и AB27 и интенсивность флуктуаций (круги) и их сопоставление авроральным овалом. На рисунке 4б показано структура аврорального овала во время бури для различных UT (модель Ovation). Интенсивность и структура овала представлены в координатах магнитная широта-местное магнитное время (MLAT-MLT). Станции расположены на одинаковых магнитных широтах (MLAT~66°N) на долготах Европы и Аляски.

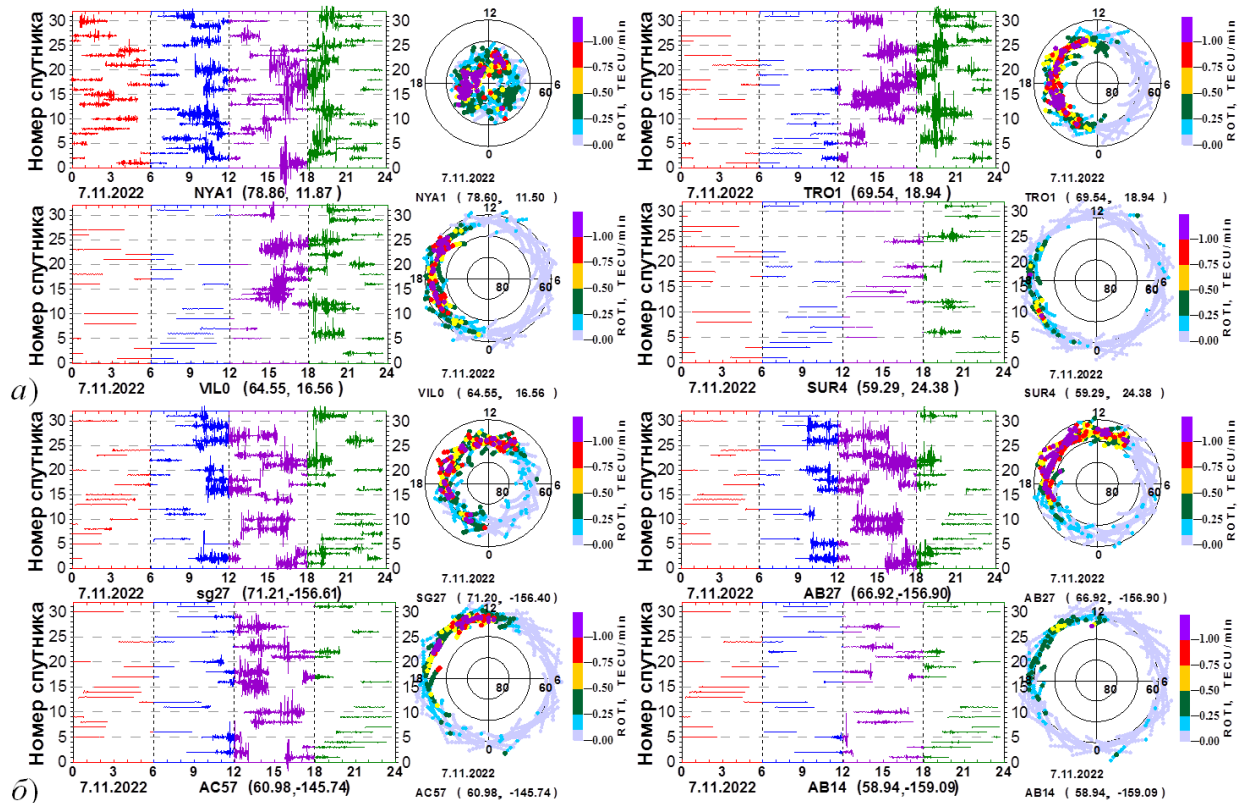


Рисунок 2. Широтное проявление ТЕС флуктуаций: Европа (а), Аляска (б).

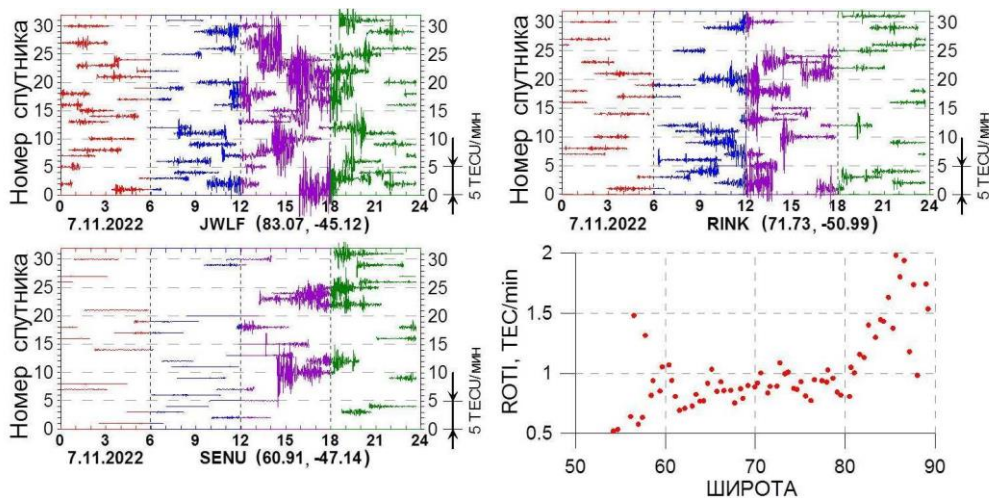


Рисунок 3. Проявление ТЕС флуктуаций (ROTI) на станциях Гренландии и широтный ход интенсивности флуктуаций (ROTI).

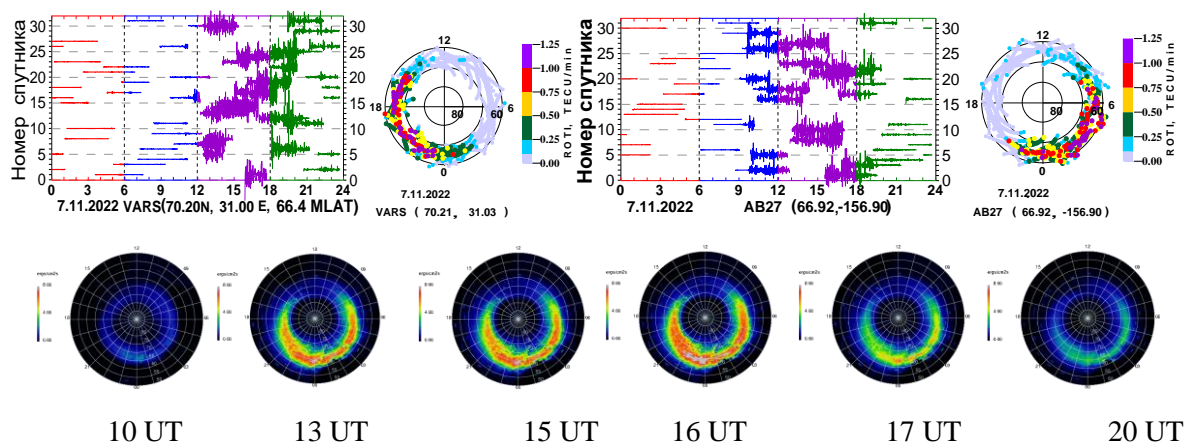


Рисунок 4.

Флуктуации проявляются на обеих станциях в дневное время. Наблюдается хорошее соответствие между развитием флуктуаций и авроральной активностью (АЕ индекс, рис.1). На разных секторах проявление флуктуаций регистрируются приблизительно в одно и, тоже мировое время (UT эффект). Максимальная интенсивность флуктуаций приходится на наибольшую интенсивность овала (интенсификации высыпаний). В целом интенсивность флуктуаций на станции AB27 несколько ниже, чем на VARS. На долготах Европы флуктуации приходились на послеполуденное магнитное время, а долготах Аляски до полудня. Так на станции VARS индекс ROTI достигал 2.1TECU/min. на временах 20-22 MLT с положением около 64°N MLAT. На станции AB27 ROTI достигал 1.5TECU/min. на временах 03-04 MLT с положением около 67°N MLAT. Существенно, что начало проявления флуктуаций станции AB27 приходилось на время около 10 UT, на VARS около 13 UT. Подобный сдвиг касается и окончания флуктуационной активности. Можно отметить, что в структуре аврорального овала наблюдается некоторая асимметричность относительно магнитного полудня. Это отражает особенность развития рассматриваемой геомагнитной бури.

### Заключение

Для анализа пространственно-временных эффектов TEC-флуктуаций во время бури 7 ноября 2022 использовались наблюдения европейской (60°–76° MLAT), американской (Аляска, 60°–70° MLAT) и гренландской (62°–85° MLAT) сети GPS-станций. Найдено, что развитие флуктуаций на разных долготах весьма похоже и развиваются в соответствии с геомагнитной активностью и динамикой аврорального овала, как с его широтным положением, так и его интенсивностью. Временное развитие флуктуаций на долготах Европы и Америки происходит практически одновременно, с временным сдвигом около трёх часов. На всех долготах максимальная интенсивность флуктуаций приходилась на 14-18 UT, во время наибольшей авроральной возмущенности. Экваториальная граница проявления флуктуаций на разных долготах достигала широт 57°–59° MLAT. Очень интенсивные флуктуации регистрировалась на широтах выше 80°N, которые ассоциированы нами с проявлением языка ионизации (ТОI структуры).

### Литература

- Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. Дневные сцинтилляции GPS сигналов по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген // *Известия РАН, серия физическая*. 2022. Т. 86. № 3. С. 428.
- Белаховский В.Б., Будников П.А., Калишин А.С. и др. Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS по данным наблюдений на Кольском полуострове // *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9. № 3. С. 58.
- Захаренкова И.Е., Черняк Ю.В., Шагмуратов И.И., Клименко М.В. Особенности проявления высокоширотных ионосферных неоднородностей в наземных GPS наблюдениях, спутниковых GPS наблюдениях и спутниковых in situ измерениях над территорией России во время геомагнитной бури 17–18 марта 2015 г. // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. Т. 58. № 1. С. 76.
- Черноус С.А., Шагмуратов И.И., Иевенко И.Б. и др. Авроральные возмущения как индикатор воздействия ионосферы на навигационные сигналы // *Химическая физика*. 2018. Т. 37. № 5. С. 77.
- Шагмуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др. Флуктуации полного электронного содержания и ошибки GPS позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 года // *Известия РАН, серия физическая*. 2021. Т. 85. № 3. С. 433.

- Шагмуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др. Сезонные особенности проявления фазовых флуктуаций навигационных сигналов и ошибок позиционирования в авроральной и полярной ионосфере // *Известия РАН, серия физическая*. 2022. Т. 86. № 12. С. 1792.
- Шагмуратов И.И., Клименко М.В., Ефишов И.И. и др. Особенности развития магнитной бури 7 ноября 2022 г. по измерениям ПЭС // *Известия РАН, серия физическая*. 2024. Т. 88. № 3. С. 369.
- 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.
- Fabbro V., Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L., Rougerie S. GNSS positioning error forecasting in the Arctic: ROTI and Precise Point Positioning error forecasting from solar wind measurements // *J. Space Weather and Space Clim.* 2021. V. 11(12). P. 43.
- Follestad A.F., Clausen L.B.N., Moen J.I., Jacobsen K.S. Latitudinal, diurnal, and seasonal variations in the accuracy of an RTK positioning system and its relationship with ionospheric irregularities // *Space Weather*. 2021. V. 19. N. 6. e2020SW002625.
- Kintner P.M., Ledvina B.M., Paula de E.R. GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather*. 2007. V. 5. N. 9. S09003.
- Makarevich R.A., Crowley G., Azeem I. et al. Auroral E-region as a source region for ionospheric scintillation // *JGR Space Physics*. 2021. V. 126. N. 5. e2021JA029212.
- Meeren van der C., Oksavik K., Lorentzen D.A. et al. Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora // *JGR Space Physics*. 2015. V. 120. N. 12. P. 10,607.