

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.004

КЛИМАТОЛОГИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ GPS СИГНАЛОВ: ПРЯМОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ

И.И. Шагимуратов¹, И.И. Ефишов¹, М.В. Филатов²,
И.Е. Захаренкова¹, Н.Ю. Тепенитчина¹, Г.А. Якимова¹

¹Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия

²ФГБНУ "Полярный Геофизический Институт", Апатиты, Россия

E-mail: shagimuratov@mail.ru

Аннотация. Проанализированы проявления фазовых флуктуаций GPS сигналов и их связи с авроральными возмущениями за период с 1 декабря 2015 по 1 января 2016 года. Были использованы GPS наблюдения авроральных, субавроральных и среднеширотных станций Европейского региона. Путем прямых сопоставлений авроральной возмущенности (АЕ индекс) и проявления флуктуаций показана тесная связь этих событий в их временном развитии.

1. 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. Доступные стандартные GPS/ГЛОНАСС измерения с 30 с. интервалом обеспечивают получение данных о фазовых флуктуациях через изменение интегральной электронной концентрации ТЕС (Total Electron Content) на трассе спутник-приемник. В качестве единицы измерения ТЕС используется TECU (1 TECU соответствует 10^{16} эл/м²).

В последнее время достаточно много работ посвящено проявлениям ТЕС флуктуаций в различных областях ионосферы [Li et al., 2010; Cherniak et al., 2015; Sieradzki and Paziewski, 2019]. Особенно сильные флуктуации, ассоциируемые с авроральными возмущениями, регистрируются в авроральном овале [Черноус и др., 2015; Shagimuratov et al., 2016]. 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].

В большинстве работ анализируются флуктуации, ассоциируемые с отдельными событиями. В данной работе рассматривается анализ прямой связи флуктуаций с поведением АЕ индекса за период с 1 декабря 2015 по 1 января 2016 года.

2. Данные. В представленном анализе использовались GPS наблюдения сети EPN в окрестности долгот около 20°Е (табл. 1). В качестве меры флуктуационной активности использовался параметр ROT (Rate Of TEC) на 1мин. интервале, интенсивность флуктуаций оценивалась индексом ROTI — дисперсией ROT. Индекс ROTI рассчитывался на 10 мин. интервале. Геомагнитные условия (рис. 1) включали слабую бурю 14 декабря, (максимальное значение Dst достигало -47 nT в 20 UT), достаточно сильные бури 20-21 декабря (максимальное значение Dst достигало -155 nT в 23 UT) и 31 декабря 2015 и 1 января 2016 года (максимум Dst — -110 nT в 01 UT 1 января). Максимальная авроральная активность 14 декабря 2015 года приходилась на 17 UT, авроральная активность проявлялась с 05 до 24 UT, для третьей бури максимальная активность проявлялась с 00 UT до 07 UT 1 января 2016 года.

Таблица 1.

Станция	Географические координаты		Геомагнитные координаты		Станция	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
	широта	долгота	широта	долгота		широта	долгота	широта	долгота
NYA1	78,55	11,52	75,77	111,78	KIR0	67,52	21,03	64,21	104,01
TRO1	69,39	18,56	66,28	103,57	VAAS	62,57	21,46	59,07	101,41

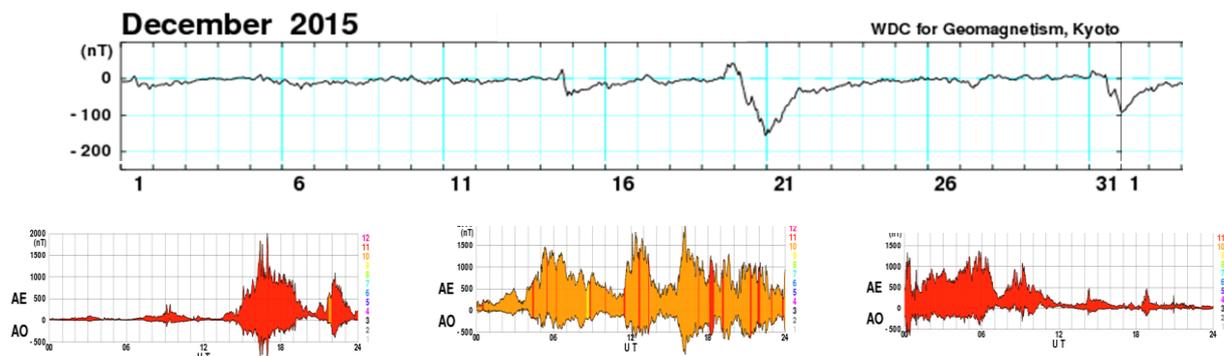


Рисунок 1. Dst с 1 декабря 2015 г. по 2 января 2016 г. и AE 14, 20 декабря 2015 г. и 1 января 2016 г. (слева направо).

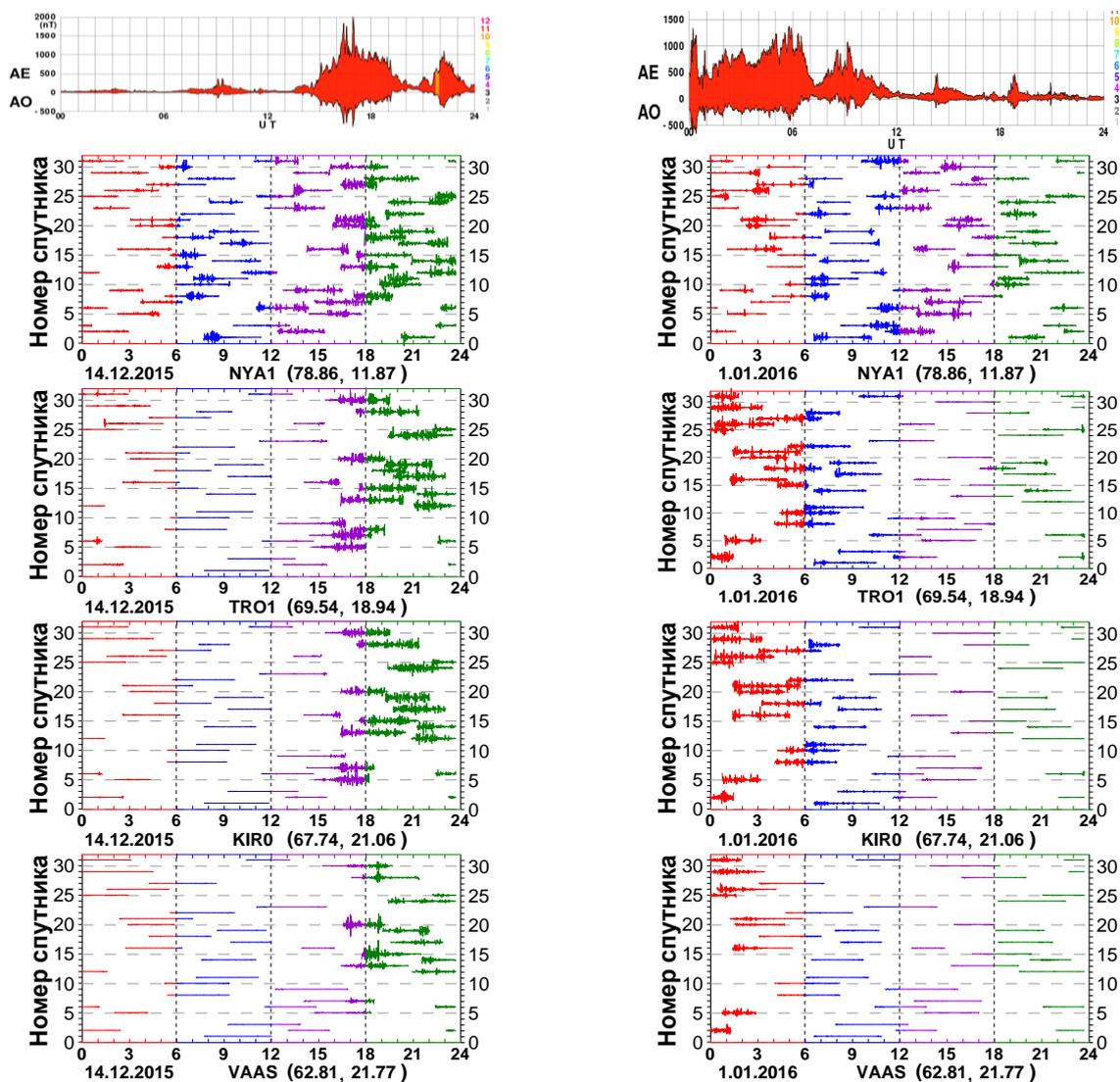


Рисунок 2. Проявление ТЕС флуктуаций и авроральной активности для 14 декабря 2015 г. и 1 января 2016 г.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлено проявление ТЕС флуктуаций и AE индекса для двух событий 14 декабря 2015 и 1 января 2016 года. Авроральная активность 14 декабря приходилась на послеполуденное время 17-24 UT. Максимальная интенсивность аврорального возмущения проявилась около 16-17 UT, максимальная

величина АЕ индекса превышала 1500 nT. В то же время АЕ индекс, соответствующий местной магнитной полуночи (около 21 UT), не превышал 1000 nT.

Как известно, максимальная интенсивность обычно наблюдается вблизи магнитной полуночи. На всех рассматриваемых станциях в диапазоне от 70 N (станция NYA1) до средних широт (станция VAAS) усиление флуктуаций проявлялось в районе 18-24 UT, что соответствует местной магнитной полуночи. Интенсивность флуктуаций спадает к экватору. На более южных станциях флуктуации практически не наблюдались. Ранее нами было введено понятие овала неоднородностей по многостанционным высокоширотным измерениям ТЕС флуктуаций [Черноус и др., 2018]. В первом приближении наблюдается подобие в поведении аврорального овала и овала неоднородностей. Поэтому можно говорить, что экваториальная граница аврорального овала для рассматриваемого возмущения располагалась на широте около 60°N геомагнитной широты. Отметим, что такое положение флуктуации для спокойного дня 13 декабря наблюдались только на высокоширотной станции NYA1.

Для бури 31 декабря - 1 января 2016 года авроральная активность наблюдалась после полуночи. Здесь также обнаруживается соответствие с поведением флуктуаций и АЕ индекса. Общий характер проявления бури в поведении ТЕС флуктуаций схож с бурей 14 декабря. Однако интенсивность флуктуаций бури заметно слабее, чем для бури 14 декабря, хотя интенсивность авроральных возмущений для обеих бурь мало различается. Основное различие в проявлении флуктуаций наблюдается по станции NYA1. Для первой бури поведение флуктуаций для станции NYA1 весьма схоже с более южными станциями. Для второй бури в суточном поведении флуктуаций явно выделяется интервал, для которого интенсивность флуктуаций была выше по сравнению с другими временными интервалами. Такое поведение можно объяснить тем, что авроральный овал сдвинулся к более южным широтам так, что станция NYA1 оказалась в области каспа.

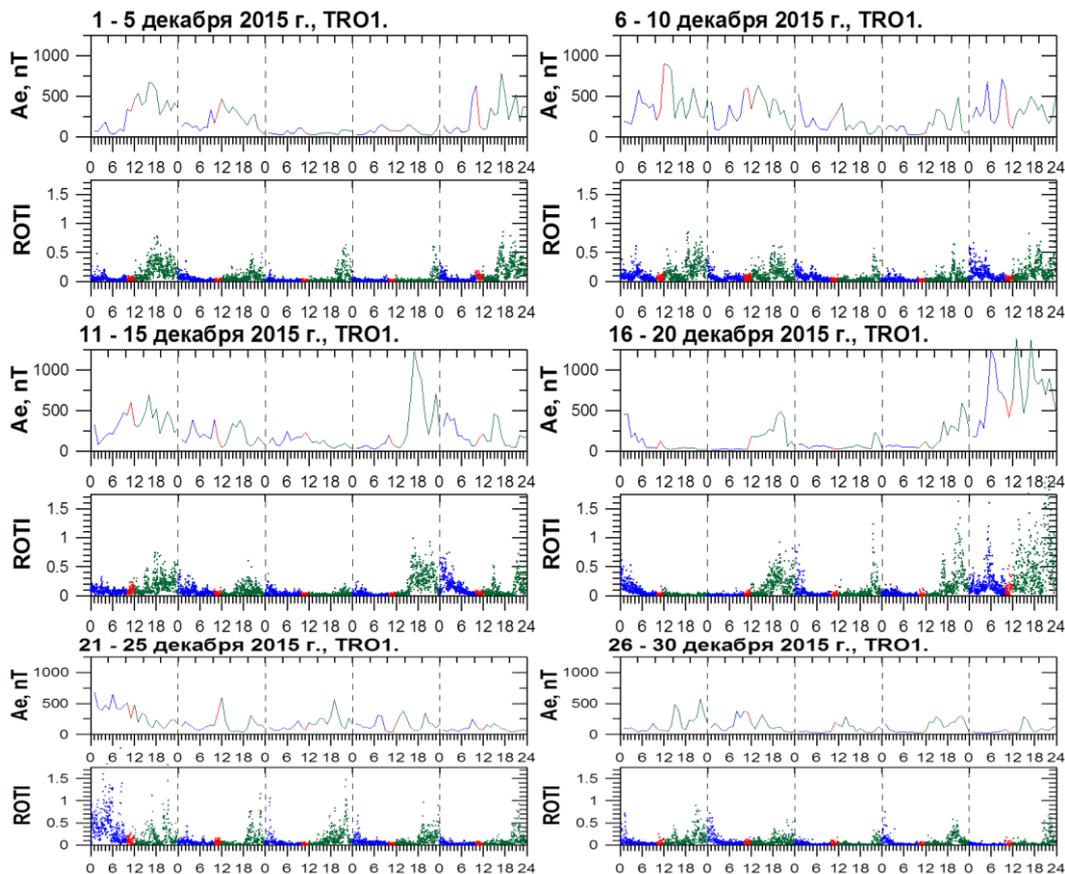


Рисунок 3. Вариации, день за днем АЕ индекса и интенсивности ТЕС флуктуаций в течение декабря 2015 года.

4. Статистика связи авроральных возмущений и ТЕС флуктуаций

На рис. 3 представлены день за днем вариации АЕ индекса и интенсивности ТЕС флуктуаций (индекс ROT I) в течение декабря 2015 года по станции Тромсе (TRO1). Цветовыми линиями выделены интервалы 00-10 UT (голубой), 10-12 UT (красный), 12-24 UT (зеленый). В целом наблюдается хорошее временное соответствие в вариациях обеих параметров. Выделяются всплески в двух параметрах во время геомагнитных бурь.

Максимальная интенсивность флуктуаций наблюдается в районе местной магнитной полуночи (около 21 UT), для дневного периода она существенно слабее. Частота авроральной возмущенности (более 70% случаев) приходится на послеполуденное время.

5. Заключение

Анализ прямой связи между вариациями AE индекса и GPS-TEC флуктуациями показал тесную связь этих событий в их временном развитии. Во время усиления авроральной возмущенности увеличивается частота и интенсивность флуктуаций GPS сигналов не только на авроральных станциях, но и на среднеширотных станциях. Статистическая картина за период с 1 декабря 2015 по 1 января 2016 года (рис. 3) проявления авроральных возмущений и TEC флуктуаций на авроральной станции TRO1 свидетельствует, что флуктуации регистрируются даже при слабой авроральной возмущенности. В суточном распределении авроральной возмущенности в более 70% случаев авроральные возмущения регистрировались в районе магнитной полуночи.

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

Список литературы

- Li G, Ning B, Ren Z, Hu L. (2010) Statistics of GPS ionospheric scintillation and irregularities over polar regions at solar minimum. *GPS Solut.* V. 14. DOI: 10.1007/s10291-009-0156-x.
- Cherniak I., Zakharenkova I., Redmon R.J. (2015) Dynamics of the high-latitude ionospheric irregularities during the 17 March 2015 St. Patrick's Day storm: Ground-based GPS measurements. *Space Weather.* V. 13, 585-597.
- Sieradzki R. and Paziewski J. (2019) GNSS-based analysis of high latitude ionospheric response on a sequence of geomagnetic storms performed with ROTI and a new relative STEC indicator. *J. Space Weather Space Clim.* V. 9. № A5. DOI: 10.1051/swsc.
- Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Filatov M V., Efishov I.I., et al. (2016) Fluctuations of GPS Signals and Auroral Activity During 17 March 2015. *Geomagnetic Storm Book proceedings.* Eighth Workshop Sunny Beach, Bulgaria, May 30 - June 3, 2016. P. 47-52.
- Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. (2018) Occurrence of TEC fluctuations and GPS positioning errors at different longitudes during auroral disturbances. *Sun and Geosphere.* V. 13. № 1, P. 89 -94.
- Черноус С.А., Шагимурагов И.И., Алпатов В.В., Филатов М.В., Будников П.А., Ефишов И.И., Федоренко Ю.В.. (2018) Авроральный овал и овал неоднородностей полного электронного содержания в различных гелиогеофизических условиях *Гелиофизические исследования в Арктике.* Вторая Всероссийская конференция 24 - 26 сентября 2018 г., Мурманск. Сборник трудов конференции, С. 102-105.
- Черноус С.А., Швец М.В., Филатов М.В., Шагимурагов И.И., Калитенков Н.В. (2015) Исследования особенностей навигационных сигналов в периоды авроральных возмущений. *Химическая физика.* Т. 34. № 10, С. 33-39.