

УДК 550.338.2

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В АВРОРАЛЬНОЙ И ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

© 2022 г. И. И. Шагмуратов¹ *, М. В. Филатов², И. И. Ефишов¹,
Н. Ю. Тепеницына¹, Г. А. Якимова¹

¹Калининградский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
“Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук”,
Калининград, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Полярный геофизический институт Кольского научного центра Российской академии наук”, Апатиты, Россия
*E-mail: shagimurатов@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Изучена статистика проявления фазовых флуктуаций GPS сигналов и ошибок позиционирования по станциям Ny-Ålesund (78.9° с.ш., 11.9° в.д.) и Tromsø (69.60° с.ш., 19.20° в.д.) для марта, июня, октября и декабря 2015 г. Для Ny-Ålesund максимум флуктуаций наблюдается около магнитного полудня, а по Tromsø около полуночи. В сезонно/суточном поведении флуктуаций и ошибок позиционирования наблюдается их высокое согласие.

DOI: 10.31857/S0367676522120250

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 геомагнитной активности и 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 может использоваться индекс $\delta\phi$ [2, 3]. При этом используются специализированные сцинтилляционные приемники с

высокой частотой измерений (50 Гц). Причем, данные с таких приемников, как правило, не доступны для большинства пользователей. 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 TEC с 30 с интервалом. Наиболее широко используемым индикатором флуктуационной активности являются параметр ROT (Rate OF TEC) и индекс интенсивности флуктуаций ROTI [5]. Индекс позволяет детектировать наличие ионосферных неоднородностей. Доступность, широкое повсеместное использование стандартных 30-секундных измерений во многом определило его использование в рассматриваемой работе. Между этими индексами выявлен достаточно значимый коэффициент корреляции 0.76 [6]. Следует отметить, что невозможно ожидать высокой, однозначной корреляции между ними. Во всяком случае, $\delta\phi$ характеризует флуктуации фазы сигнала, а ROT флуктуации TEC.

В полярной области (78°–82° магнитной широты) интенсивные флуктуации ассоциируются с полярными пятнами повышенной ионизации (polar patches), высыпаниями частиц в авроральном овале и каспе [7, 8]. В авроральной области фазовые флуктуации обычно наблюдаются в пе-

Таблица 1. Географические, исправленные геомагнитные координаты станций и время магнитной полуночи (UT)

Станция	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты		UT (для магнитной полуночи)
	широта, град	долгота, град	широта, град	долгота, град	
NYA1	78.9	11.9	76.6	109.4	21:12
TRO1	69.7	18.9	66.9	102.2	21:14

риоды авроральных возмущений вблизи местной магнитной полуночи и тесно связаны с динамикой аврорального овала [9, 10]. В работе [11] 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.

Сезонные проявления флуктуаций мало представлены в литературе. По GPS наблюдениям канадской сети высокоширотных станций дан анализ сезонных проявлений фазовых флуктуаций за период 2008–2013 гг. [4], для европейского сектора – за период 2010–2017 гг. по станции Ny-Ålesund [12].

В рассматриваемой работе представлен анализ сезонных проявлений фазовых флуктуаций и ошибок позиционирования в авроральной и полярной ионосфере в максимуме солнечной активности. В качестве меры интенсивности фазовых флуктуаций использовался индекс *ROTI*. Флуктуации могут вызывать сбои навигационных сигналов, срывы, скачки фазы и в конечном итоге могут приводить к нарушениям работы навигационных систем [13, 14]. Анализ ошибок навигационных измерений представлен в большей части для сильных магнитных бурь. В данной работе мы акцентировали внимание на оценках ошибок для условий слабо возмущенной ионосферы. Сезонное поведение ошибок позиционирования практически не представлено в литературе. Данные о вариациях ошибок особенно важны для навигации в Арктике.

ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЯ

В качестве исходных данных служили стандартные 30-секундные двухчастотные GPS измерения. Привлекались GPS наблюдения полярной

станции Ny-Ålesund (NYA1) и авроральной станции Tromsø (TRO1) (табл. 1).

Для оценки флуктуационной активности использовался индекс *ROTI*. Единица измерения *ROTI* – TECU/мин: 1 TECU = 10^{16} электрон/м². Основные аспекты методики освещены в работе [15, 16]. Индекс рассчитывался на 5 мин интервале для всех видимых станций спутников с углами возвышения спутников выше 20°. Мы применили дополнительную обработку полученных данных с целью выявления и коррекции фазовых сдвигов (cycle slips, потеря фазы, “перескок” фазы), а также устранения возможных выпадающих значений. Измерения корректировались на скачки фазы (cycle-slips) при их величине более 5 TECU на интервале 30 с [17].

В настоящее время разработаны методы и алгоритмы определения координат потребителя с точностью до сантиметров по измерениям одного приемника, при этом не привлекают измерения опорных станций PPP (Precise Point Positioning). Мы анализировали связь между интенсивностью ГЕС флуктуаций и ошибками позиционирования, используя GIPSY программу NASA (<http://apps.gdgps.net>). В алгоритме учитываются многие факторы, которые влияют на точность определения координат местоположения приемника [18]. В качестве входных данных использовались RINEX файлы, содержащие групповые и фазовые задержки сигналов с 30-секундным интервалом измерений. В процессе обработки удалялись данные с выбросами [6]. На выходе формировались x, y, z координаты точки наблюдения. На основе их рассчитывались 3D-ошибки (P_{3D}):

$$P_{3D}(i) = \sqrt{(x(i) - x_0)^2 + (y(i) - y_0)^2 + (z(i) - z_0)^2}, (1)$$

где x_0, y_0, z_0 – осредненные координаты точки наблюдения.

Ошибки определялись с 5 мин интервалом в кинематическом режиме.

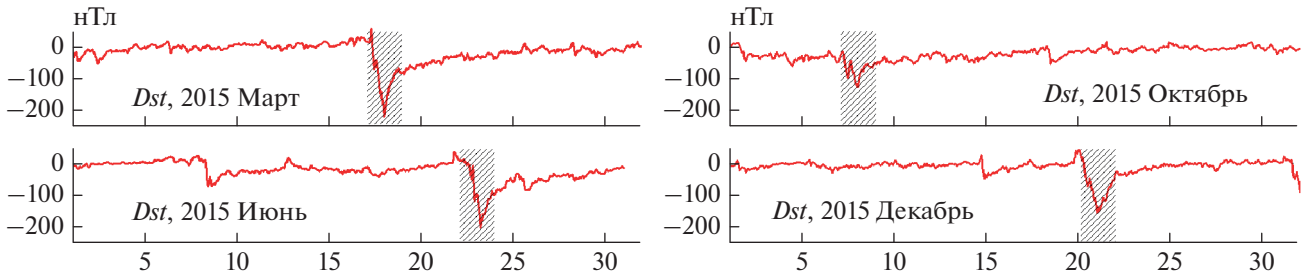


Рис. 1. Вариации Dst для марта, июня, октября и декабря 2015 г. Штриховкой отмечены интервалы, исключенные из анализа.

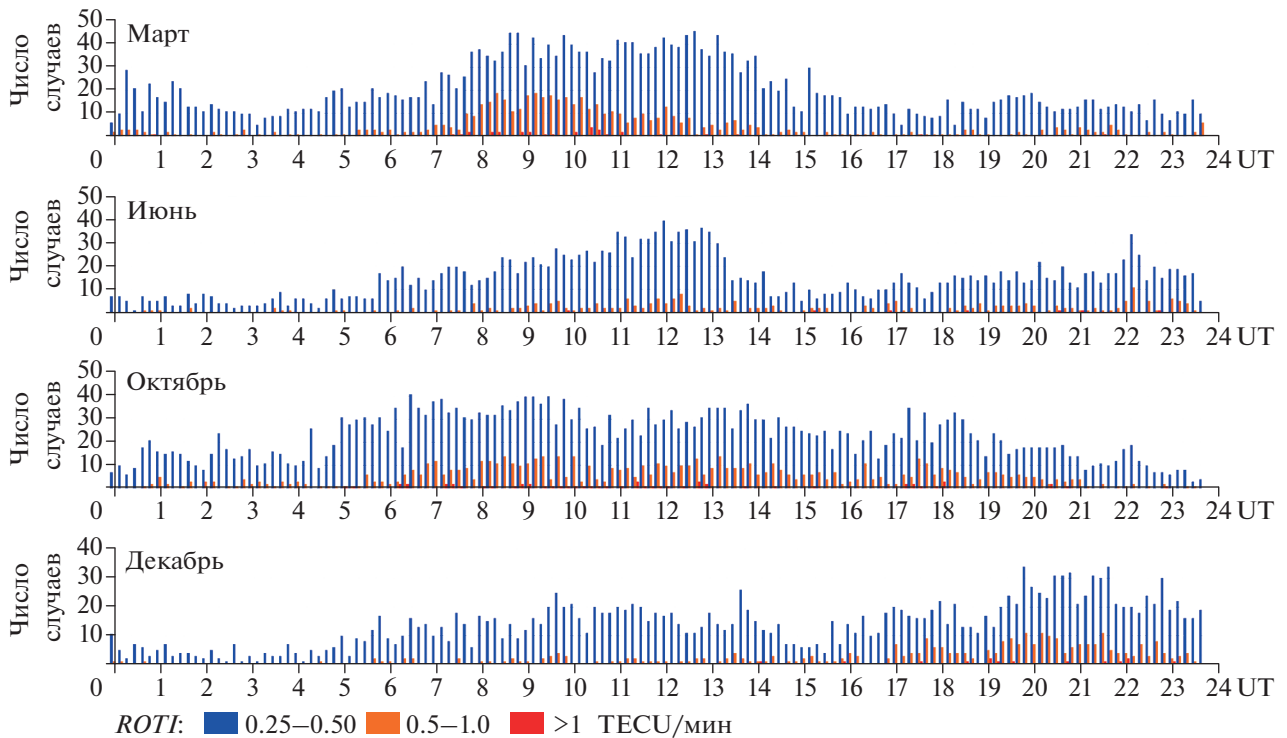


Рис. 2. Сезонно/суточное проявление интенсивности флуктуаций ($ROTI$) для каждого месяца по станции NYA1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геомагнитная обстановка

На рис. 1 показана геомагнитная обстановка для рассматриваемых месяцев. Известно, что во время магнитных бурь существенно увеличивается вероятность проявления флуктуаций и ошибки позиционирования [19, 20]. Анализ эффектов бурь показал, что проявления флуктуаций навигационных сигналов и их влияние на точность позиционирования являются индивидуальными для каждой бури. Для корректного анализа сезонных эффектов мы исключали из рассмотрения наиболее возмущенные дни. Следует отметить, что число дней, соответствующих умеренным

возмущениям, не превышало 5–10% от общего количества случаев.

Сезонные эффекты в полярной ионосфере

На рис. 2 показано суточное распределение интенсивности фазовых флуктуаций ($ROTI$) по станции NYA1 для разных месяцев. При этом исключались данные, которые приходились на магнитные бури. Индекс $ROTI$ рассчитывался день за днем в течение каждого месяца. Количество данных составляло около 8000 для каждого рассматриваемого периода. На рис. 2 показано суточное поведение $ROTI$ интенсивностью более 0.25 TECU/мин. Значения $ROTI$ меньше этой ве-

личины (слабые флуктуации) не зависят от времени суток и не представлены на рисунке.

Станция Ny-Ålesund обеспечивает мониторинг ионосферы в радиусе около 600 км в широтном диапазоне 78–82° магнитной широты [3, 12]. Проявления флуктуаций на этой станции ассоциируются с каспом, полярной шапкой, авроральными овалам [2]. Фазовые флуктуации часто наблюдаются на дневной стороне каспа на магнитных широтах 73.5°–80° в интервале 09–15 MLT (06–12 UT), 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 рис. 2, 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 (сильных) флуктуаций ($ROTI > 0.5$ 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 в 1.5–2 два раза меньше, чем в марте равноденствие (рис. 2). 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 же 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 рис. 2 следует, что для декабря дневной максимум менее выражен, в то же время интенсивность и вероятность флуктуаций хорошо проявляется в вечернее время.

Такому сезонному поведению флуктуаций можно сделать следующее пояснение. В полярной области наблюдаются различные виды возмущений, с которыми могут ассоциироваться флуктуации. Чаще всего интенсивные флуктуации ассоциируются с полярными патчами, 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–декабре 2015 г. снизилось к мартовскому значению 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.

Сезонные эффекты флуктуаций в авроральной ионосфере

На рис. 3 представлено проявление фазовых флуктуаций по станции TRO1 для рассматриваемых периодов. 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 [9–11].

Для всех месяцев 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 флуктуаций ($ROTI > 0.5$ TECU/мин). 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. Временной интервал проявления флуктуаций расширился в сторону более ранних часов.

Сезонные проявления ошибок позиционирования

На рис. 4 представлено временное распределение числа случаев, когда регистрировались ошибки определенной величины для разных месяцев.

В сезонно/суточной зависимости поведения интенсивности флуктуаций ($ROTI$) и ошибок по-

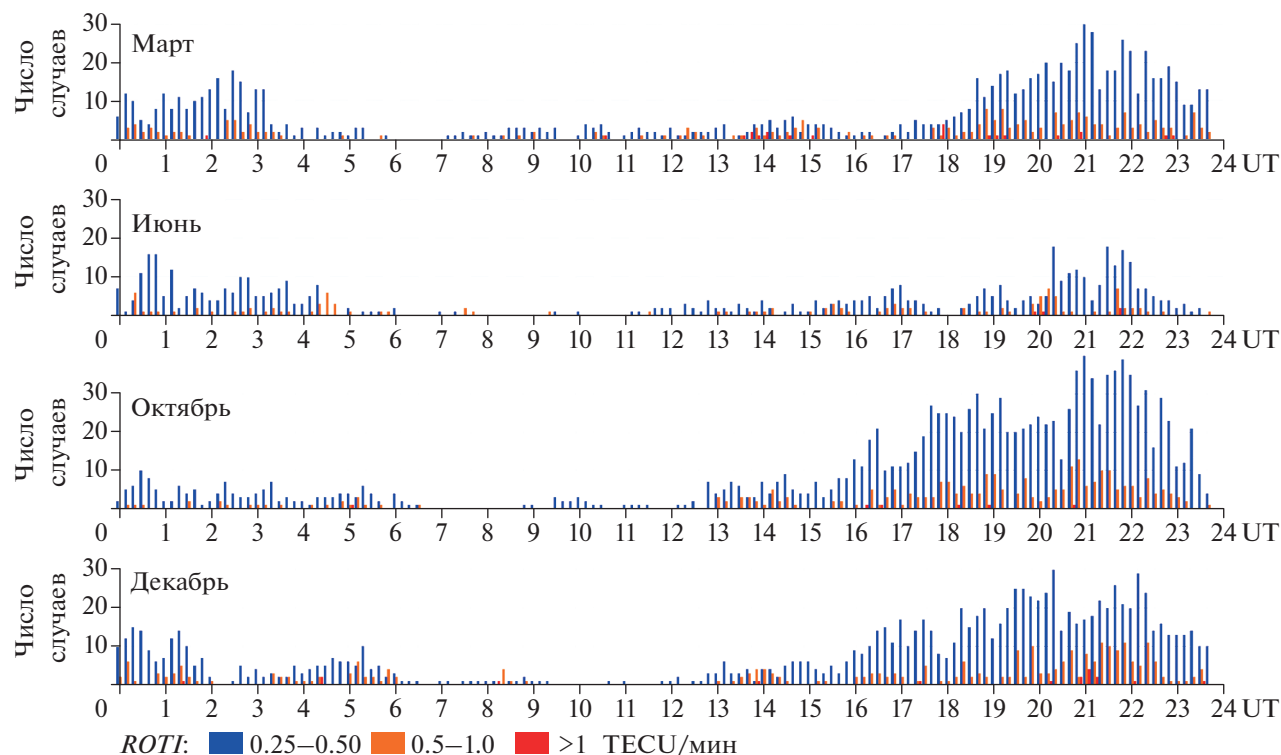


Рис. 3. Сезонно/суточное проявление флуктуаций по станции TRO1.

позиционирования наблюдается хорошее соответствие.

В работе [18] представлена статистика индекса ROTI и его корреляция с PPP ошибками. Выявлена нелинейная корреляция между этими величинами. По станции NYA1 коэффициент корреляции составил 0.39, а по TRO1 – 0.67.

Основное отличие в поведении ошибок по обеим станциям заключается в следующем. Для NYA1 максимальные ошибки регистрируются в дневное время (за исключением декабря), а для TRO1 в вечерние часы в районе магнитной полуночи. Для обеих станций магнитная полночь приходится примерно на 21 UT (табл. 1). В целом число случаев ошибок более 0.1 м для TRO1 в 2–3 раза больше, чем для NYA1.

Как следует из рис. 4, максимальная вероятность ошибок по станции NYA1, за исключением декабря, приходилась на дневное время. При этом в марте количество случаев ошибок в диапазоне 0.2–0.5 м составило около 10–12%. Процент ошибок выше 1 м составил величину около 4%. Минимальное число случаев ошибок выше 0.5 м регистрировалось в июне, и несколько больше в октябре. В декабре максимальное число случаев, когда регистрировались ошибки выше фоновой величины (0.03–0.05 м), приходилось на вечернее время, что согласуется с поведением индекса ROTI.

По станции TRO1 процент ошибок в рассматриваемом диапазоне максимален в марте и минимален в июне. Максимальные ошибки позиционирования на станции TRO1 наблюдаются в районе магнитной полуночи для всех месяцев. В июне число случаев ошибок более 0.2 м является редким событием.

Хорошо известно, что сильные флуктуации обуславливают увеличение погрешностей навигационных измерений. Следует отметить, что важным фактором, определяющим точность позиционирования, является не только интенсивность флуктуаций. Не менее важным является количество спутников, сигналы которых подвержены флуктуациям, что проявляется во время прохождения навигационных сигналов через дискретные формы полярных сияний [11]. При увеличении числа спутников, сигналы которых подвержены флуктуациям, максимальные ошибки могут превышать 5–10 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована статистика проявления фазовых флуктуаций GPS сигналов и ошибок позиционирования в полярной и авроральной ионосфере для марта, июня, октября и декабря 2015 г. Анализ касается спокойных и слабо возмущенных геомагнитных условий. В качестве исходных данных

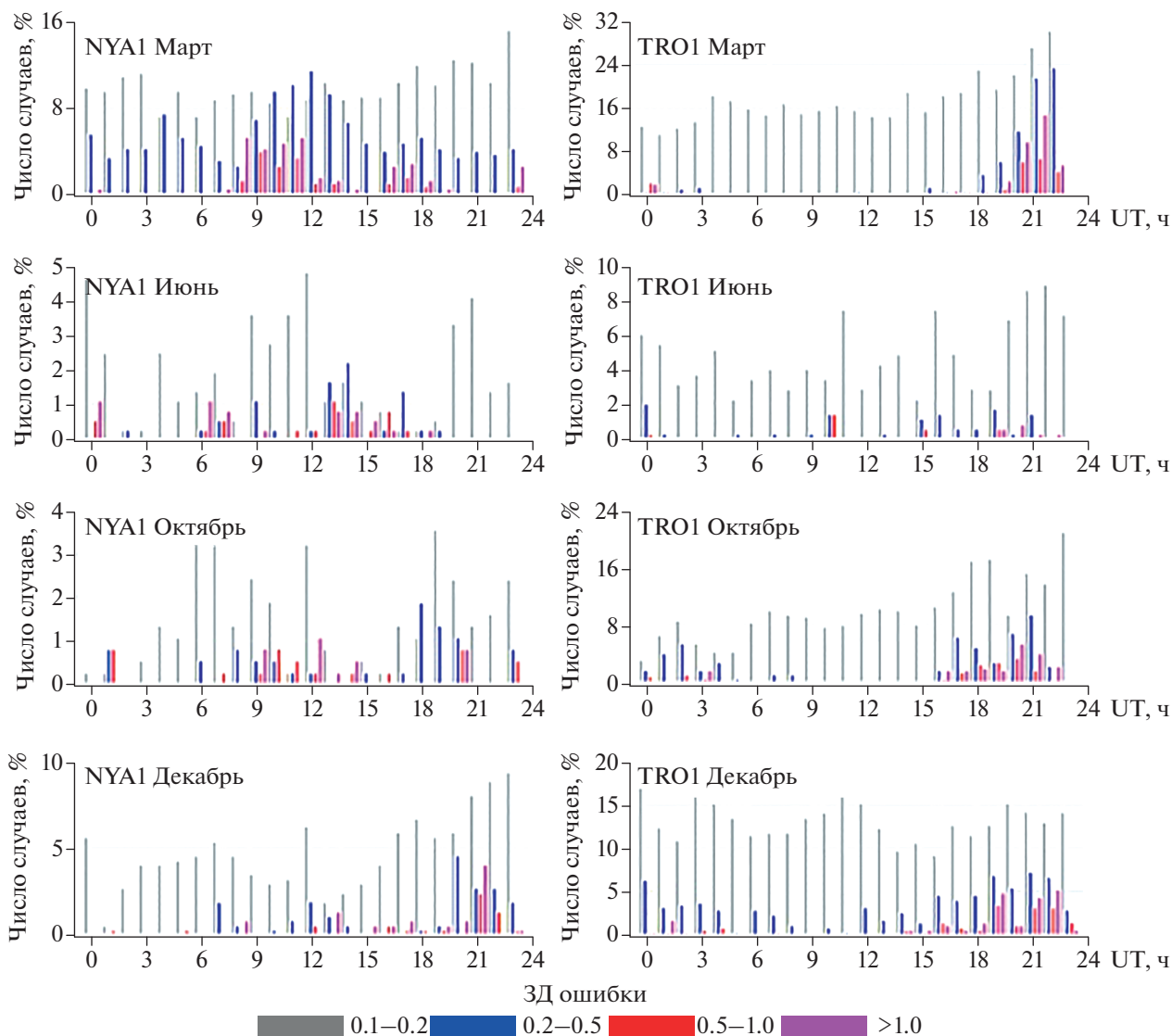


Рис. 4. Распределение 3D ошибок позиционирования в зависимости от времени для разных месяцев.

использованы GPS наблюдения станций NYA1 (76.6° с.ш. MLAT) и TRO1 (66.73° с.ш. 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. Характерная особенность проявления флуктуаций наблюдалась в декабре, когда максимум флуктуаций был зарегистрирован в вечернее время (около магнитной полуночи). Вероятно, это обусловлено реакцией ионосферы на изменение солнечной активности, которая существенно снижалась после марта. По станции TRO1 флуктуации обычно регистрировались в районе магнитной полуночи. Наиболее низкая активность флуктуаций на обеих станциях регистрировалась в июне.

В целом ошибки позиционирования и интенсивность флуктуаций (*ROTI*) находятся в хорошем согласии. Крайне низкая вероятность проявления ошибок (более 0.1–0.2 м) была зарегистрирована в июне.

Максимальные величины ошибок могут составлять более 1 м, а в отдельные моменты превышать 5–10 м. Полученные результаты позволяют оценить влияние флуктуаций на точность позиционирования в Арктике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. // Space Weather. 2007. V. 5. No. 9. Art. No. S09003.
2. Franceschi G., Spogli L., Alfonsi L. et al. // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 9232.

3. Spogli L., Alfonsi L., de Franceschi G. et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 3429.
4. Prikryl P., Jayachandran P.T., Chadwick R. et al. // Ann. Geophys. 2015. V. 33. P. 531.
5. Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J. et al. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. No. 18. P. 2283.
6. Pi X., Mannucci A.J., Valant-Spaight B. et al. // Proc. ION 2013 Pacific PNT Meeting (Honolulu, 2013). P. 752.
7. Jin Y., Moen J.I., Oksavik K. et al. // J. Space Weather Space Clim. 2017. V. 7. Art. No. A23.
8. Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. // Ann. Geophys. 2021. V. 39. P. 687.
9. Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. // Sun Geophys. 2018. V. 13. P. 89.
10. Черноус С.А., Филатов М.В., Шагимуратов И.И. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 5. С. 77; Chernouss S.A., Filatov M.V. Shagimuratov I.I. et al. // Russ. J. Phys. Chem. 2018. V. 12. No. 3. P. 562.
11. Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 433;
12. Jin Y., Miloch W.J., Moen J.I., Clausen B.N. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Art. No. A48.
13. Jin Y., Oksavik K. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2018. V. 123. P. 7943.
14. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Тумова М.А. // Косм. иссл. 2016. Т. 54. № 1. С. 23.
15. Shagimuratov I.I., Krankowski A., Ephishov I. et al. // Earth Planets Space. 2012. V. 64. No. 6. P. 521.
16. Захаренкова И.Е., Черняк Ю.В., Шагимуратов И.И. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2018. Т. 58. № 1. С. 76.
17. Sieradzki R., Paziewski J. // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. Art. No. A5.
18. Jacobsen K.S., Dähnn M. // J. Space Weather Clim. 2014. V. 4. Art. No. A27.
19. Yang Z., Morton Y., Zakharenkova I. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2020. V. 125. No. 7. Art. No. e2019JA027681.
20. Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K. et al. // Remote Sens. 2020. V. 12. No. 10. P. 1579.

Seasonal features of phase fluctuations occurrence of navigation signals and positioning errors at auroral and polar ionosphere

I. I. Shagimuratov^{a,*}, M. V. Filatov^b, I. I. Ephishov^a, N. Yu. Tepenitsyna^a, G. A. Yakimova^a

^a*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy, West Department, Kaliningrad, 236035 Russia*

^b*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

*e-mail: shagimuratov@mail.ru

We presented a statistical study of the GPS signals phase fluctuations occurrence and positioning errors at Ny-Ålesund (78.9° N, 11.9° E) and Tromsø (69.60° N, 19.20° E) for March, June, October, and December 2015. The highest fluctuations activity at Ny-Ålesund was occurred around magnetic noon while at Tromsø do magnetic midnight. The seasonal/diurnal course of fluctuations and positioning errors show match well coincidence.