УДК 550.338.2

ФЛУКТУАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И ОШИБКИ GPS ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПОЛЯРНЫМИ СИЯНИЯМИ ВО ВРЕМЯ АВРОРАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ 27 СЕНТЯБРЯ 2019 ГОДА

© 2021 г. И. И. Шагимуратов^{1,} *, М. В. Филатов², И. И. Ефишов¹, И. Е. Захаренкова¹, Н. Ю. Тепеницына¹

¹Калининградский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия ²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия *E-mail: shagimuratov@mail.ru Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Представлен анализ проявления флуктуаций навигационных сигналов в Арктике, обусловленных авроральным возмущением 27 сентября 2019 г. В этот период были выявлены аномально 3D ошибки позиционирования навигационных измерений на европейских авроральных станциях. Показано, что большие ошибки позиционирования обусловлены прохождением навигационных сигналов через интенсивные дискретные формы сияний.

DOI: 10.31857/S036767652103025X

введение

В последнее время освоению Арктики придается особое внимание, об этом свидетельствует указ президента "Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 г.". В частности, одним из пунктов в сфере развития инфраструктуры Арктической зоны заявлена реализация комплекса мер по навигационному обеспечению. Одной из важнейших и актуальных проблем является обеспечение высокой точности навигации в условиях Арктики.

Главным источником погрешности навигационных измерений с использованием космических систем ГЛОНАСС/GPS является ионосфера Земли. В числе факторов, влияющих на погрешность позиционирования, доминирующую роль играют флуктуации фазы сигнала на трассе спутникприемник. Флуктуации обусловлены присутствием в полярной ионосфере неоднородностей различных масштабов. Неоднородности структурированы по широте в соответствии с разделением высокоширотной ионосферы на субавроральную, авроральную, полярную шапку, касп. Поэтому и флуктуационная активность существенно различается по широте. Медленные флуктуации, обусловленные рефракцией сигналов на крупномасштабных неоднородностях. характеризуют флуктуации полного электронного содержания (TEC – Total Electron Content) вдоль луча спутник-приемник. Быстрые флуктуации, носящие название сцинтилляций, обусловлены дифракцией сигналов на мелкомасштабных неоднородностях. Как показывают исследования, медленные флуктуации (далее флуктуации) наиболее сильно могут влиять на качество навигационных сигналов. Стандартные ГЛОНАСС/GPS наблюдения с 30 с интервалом обеспечивают сравнительно простое выделение флуктуаций по фазовым измерениям. Флуктуации трансионосферных сигналов наблюдаются вблизи местной магнитной полуночи и ассоциируются с авроральными возмущениями. Проявление флуктуаций тесно связано с динамикой аврорального овала [1]. Флуктуации могут вызывать сбои навигационных сигналов. Так, в работе [2] дана статистка сбоев за период 2010-2014 гг. в арктическом регионе. В качестве критерия сбоев использовались изменения полного электронного содержания – более 1 ТЕСИ за минуту (ТЕСИ – общепринятая единица измерения ТЕС). Показано, что число сбоев может увеличиваться во время геомагнитных возмущений в Арктике в несколько раз по сравнению со спокойными условиями. Проявление флуктуаций в зависимости геофизических условий на высоких широтах за период 2008-2013 гг. представлено в работах

Станция	Географические координаты		Геомагнитные координаты	
	широта	долгота	широта	долгота
NYAL	78.55	11.52	75.77	111.78
TRO1	69.39	18.56	66.28	103.57
KIR0	67.52	21.03	64.21	104.01
VAAS	62.81	21.77	60.51	110.50

Таблица 1. Данные наблюдений разных станций

[3—5]. Сбои, срывы, скачки фазы навигационных сигналов (sycle sleeps) в конечном итоге могут приводить к нарушениям работы навигационных систем [6]. Флуктуации, сцинтилляции, обусловленные авроральными возмущениями, и их воздействие на навигационные сигналы в последние время вызывают большой интерес [7—9]. Проявление фазовых флуктуаций на разных долготах и их влияние на ошибки позиционирования представлены в работе [10].

Особое внимание исследователей было уделено самой сильной буре 24 солнечного цикла 17 марта 2015 г. Динамика пространственно-временного распределения флуктуаций во время этой бури показана в работах [11, 12]. Интенсивные флуктуации 17 марта 2015 г. в американском секторе наблюдались вплоть до широты 45° с.ш. Во время этой бури полярные сияния наблюдались даже на широтах 50°-60° с.ш.

В последние годы повышаются требования к точности навигационных ГЛОНАСС/GPS измерений. В настоящее время разработаны методы и алгоритмы определения координат потребителя с точностью до сантиметров по измерениям одного приемника, без привлечения измерений опорных станций. Метод получил название Precise Point Positioning (PPP) [13]. В последние годы метод получил дальнейшее развитие и широко используется для оценки ошибок позиционирования во время геомагнитных возмущений [14, 15]. В одной из первых работ [16] было показано, что флуктуации усиливались, когда в ионосфере наблюдались полярные сияния в виде лучистых дуг. Наши предварительные исследования показали, что при прохождении навигационного сигнала через полярные сияния наблюдался сбой приема сигнала спутника [17, 18]. Эта ситуация касалась сбоя сигнала отдельного спутника. В данной работе мы показываем, как полярные сияния приводят к увеличению ошибок позиционирования. а также демонстрируем конкретные величины ошибок позиционирования, обусловленных возмущением 27 сентября 2019 г., и их связь с полярными сияниями.

Максимальная величина 3-часового Кр индкса достигала +5, сумма Кр = 23, а индекс D_{st} достигал 50 нТ на интервале 21–23 UT. Обратим внимание, что данное возмущение можно отнести к умеренным по интенсивности. Несмотря на это, оно вызвало большие кратковременные (2-5 мин) ошибки определения местоположения.

МЕТОДОЛОГИЯ И ДАННЫЕ

В качестве исходных данных служили стандартные 30 с двухчастотные фазовые измерения. Привлекались наблюдения авроральных и субавроральных станций, расположенных на долготах около 20° в.д. (табл. 1). Для определения абсолютной величины ТЕС использовался комплекс программ, разработанных в Калининградском филиале ИЗМИРАН. Процедура обработки сигналов навигационных спутников представлена в работе [19].

В качестве меры флуктуационной активности использовалась скорость изменения вертикального электронного содержания ионосферы на 1 мин интервале – ROT (Rate of TEC).

Единица измерения ROT – TECU: 1 TECU = 10^{16} электрон/м². Интенсивность флуктуаций оценивалась через индекс ROTI:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}.$$
 (1)

Индекс характеризует дисперсию параметра ROT. Индекс ROTI определялся на 10 мин интервале для всех спутников, которые наблюдались над станцией с углами места более 20°.

Авроральная активность оценивалась AE индексом. Полярные сияния фиксировались на станции Кируна (KIR0) камерой полного неба (http://www2.irf.se/allsky/dasc).

Мы анализировали связь между интенсивностью TEC-флуктуаций и PPP ошибками, используя GIPSY – программу NASA Jet Propulsion Labогаtory (http://apps.gdgps.net). В качестве входных величин использовались RINEX файлы, содержащие групповые и фазовые измерения задержек навигационных сигналов. На выходе формировались x, y, z координаты каждые 30 с. 3D ошибки (P_{3D}) определялись как детрендированные координаты от средних значений (x_0 , y_0 , z_0) на каждую эпоху [20]. Ошибки 3D определялись с 30 с интервалом:

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



Рис. 1. Вариации ТЕС флуктуаций (ROT) их интенсивность (ROTI) на различных европейских станциях для 27 сентября 2019 г. Флуктуации показаны для всех наблюдаемых спутников на 24-часовом интервале.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены вариации ROT (слева) и ROTI (справа) для авроральных и субавроральных станций. Вариации ROT показывают TEC-

флуктуации для всех спутников, видимых станцией на 24-часовом интервале. Интенсивность флуктуаций (ROTI) показана на кругах в координатах: часы-магнитная широта. Флуктуационная

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 3 2021



Рис. 2. Ошибки позиционирования (3D) для авроральных и субавроральной станции для спокойного (25 сентября) и возмущенного (27 сентября) дней.

активность хорошо коррелирует с поведением AE индекса (здесь не показанный). На всех станциях флуктуации проявляются после 15 UT. К низким широтам их проявление сдвигается к ночным часам и наблюдаются вблизи местной магнитной полуночи (MLT). Для рассматриваемых станций MLT ~ 21 UT.

К низким широтам уменьшается и количество спутников, сигналы которых подвержены флуктуациям. Как видно на кругах, они наблюдаются на спутниках, траектории которых располагаются ближе к полюсу. Общее развитие флуктуаций согласуется с поведением аврорального овала, который во время геомагнитных возмущений, как известно, расширяется к экватору. Следует отметить, что развитие флуктуаций для станции Ню-Олесунн (NYAL) существенно отличается от их поведения на остальных станциях. На данной станции флуктуации наблюдались в дневное время, что характерно для станций, находящихся в каспе.

Для спокойных дней 25 и 26 сентября на авроральных широтах по стациям TRO1, KIR0, VAAS регистрировались слабые флуктуации лишь в утренние часы.

ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Мы определяли 3D ошибки позиционирования для обсуждаемых станций, используя программу GIPSY в онлайн режиме, в кинематической опции. В качестве входных данных использовались RINEX файлы с 30 с интервалом. Привлекались навигационные измерения для спутников с углами места более 20°, чтобы избежать влияния регулярных горизонтальных градиентов ТЕС.

На основе статистики связи интенсивности флуктуаций (ROTI) с ошибками позиционирования выявлено, что между ними имеется четкая положительная корреляция, которая носит нелинейный характер. Особенно это проявляется при малых величинах ROTI [12, 20].

На рис. 2 представлены ошибки позиционирования для спокойного (25 сентября) и возмущенного (27 сентября) дня на авроральных и субавроральных станциях в интервале 12-24 UT. До 12 ч ошибки были малыми и не представляют интереса. Для спокойного дня максимальные ошибки наблюдались после 23 ч. Ошибки уменьшались с понижением широты и не превышали 50 см. В день возмущения ошибки возросли более чем на два порядка и достигали нескольких десятков метров. Характерной особенностью их поведения явилось то, что увеличенные ошибки регистрировались как кратковременные выбросы длительностью 2-6 мин. На всех станциях возрастание ошибок приходилось на время около 18 и 22 UT. Аномально большие ошибки проявились на станциях TRO1 и KIR0. Как упоминалось выше, в условиях дискретных полярных сияний регистрировалось нарушение приема навигационных сигналов. При этом не обсуждалось, как это может сказаться на ошибках позиционирования. По станции KIR0 мы располагали информацией о проявлении сияний на основе данных наблюдений камер полного неба. Во время возмущения над станцией KIR0 наблюдались интенсивные



Рис. 3. Детальная картина проявления TEC-флуктуаций вдоль пролета спутников по станции KIR0 в окрестности 18 UT и 22 UT.



Рис. 4. Карты полного неба (сияний) и положение спутников по станции KIR0 в окрестности 18 и 22 UT.

дискретные формы сияний. С учетом этого обстоятельства мы провели детальный анализ флуктуаций навигационных сигналов около 18 UT и 22 UT, когда регистрировались аномально большие ошибки позиционирования. На рис. 3 показаны вариации флуктуации сигналов (ROT) для спутников, которые наблюдались в зоне радиовидимости станции KIR0 в окрестности 18 UT (рис. 3a) и 22 UT (рис. 3б). Общее число спутников, которые находились в зоне радиовидимости станции, равнялось 7. В окрестности 18 UT находились спутники №№ 4, 5, 7, 9, 13, 27 и 30. Два спутника (№№ 4 и 27) в это время наблюдались под относительно низкими углами места – соответственно 23° и 21°. На фоне временного развития флуктуаций хорошо выделяются кратковременные всплески спутников №№ 5, 13, 30. Максимальная интенсивность флуктуаций (ROTI) составила около единицы, что превышало величину флуктуаций вне всплесков. В окрестности 22 UT находилось 10 спутников с №№ 1, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 24, 28. Из них пять спутников наблюдались под углами меньше

23°. Спутники, для которых регистрировались изолированные всплески, находились под высокими углами места. Известно, что при низких углах возвышения спутников величина ROTI увеличивается. В обоих случаях длительность всплесков составляла 20–30 мин. Такие всплески могут быть обусловлены пересечением сигнала дискретных форм сияний. В окрестности 18 UT число спутников, которые подвержены подобным флуктуациям, равнялось трем, соответственно для 22 UT – четырем. Известно [10], что с увеличением количества спутников, подвергающихся флуктуациям, ухудшается точность позиционирования. Это, повидимому, объясняет, почему для 22 UT 3D ошибка почти в три раза больше, чем для 18 UT.

Снимки полного неба по станции Кируна поставляются шведским Институтом Космической Физики. Камеры позволяют делать снимки с миллисекундном интервалом. На рис. 4 показаны карты всего неба в окрестности 18 и 22 UT, когда наблюдались большие ошибки позиционирования. Снимки Картинки описывают характер сияний и их положение в пространстве. В указанное время наблюдались интенсивные дискретные формы сияний. На рис. 4а схематически показана ориентация сторон света на картах полного неба. На снимках рис. 4 видно, что дискретные сияния характеризуются большой динамикой. На 1 мин интервале положение и форма сияний может сушественно изменяться. На рис. 4 указаны положения спутников, которые были в зоне видимости станции KIR0 на конкретные моменты времени. Видно, что спутники, флуктуации которых проявлялись в виде всплесков (рис. 3) в окрестности 18, 22 UT, находились зоне сияний или сигналы переискали их. В отличие от высокой динамики сияний, положение спутника мало меняется в течение характерного времени всплесков. Поэтому в силу высокой динамики сияний, навигационные сигналы могли пересекать за это время несколько дискретных форм сияний. Этим можно объяснить осцилляции в огибающей всплесков на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время возмущения 27 сентября 2019 г. ТЕСфлуктуации проявились после 17 UT в соответствии с временным развитием авроральной активности. Максимальная интенсивность флуктуаций регистрировалась на станциях TRO1 и KIR0 и уменьшалась по направлению к экватору. Анализ 3D ошибок позиционирования выявил аномально большие значения ошибок в окрестности 18 и 22 UT. В это время ошибки превышали 20 м и более, а в остальное время они варьировали в диапазоне 10-50 см. Особенностью аномальных ошибок явилась их изолированность, а также кратковременный характер (2-5 мин). Во временном поведении детальный анализ флуктуаций в окрестности 18 и 22 UT выявил наличие всплесков повышенной интенсивности длительностью 20-40 мин. Этот анализ проведен по станции KIR0, для которой имелись данные о полярных сияниях. В рассматриваемые периоды наблюдались интенсивные дискретные формы сияний. Сопоставление ошибок, флуктуаций и полярных сияний позволило сделать вывод, что аномально большие ошибки позиционирования обусловлены пересечением (прохождением) навигационных сигналов через дискретные формы сияний. Поэтому при навигации в Арктике следует учитывать, что в условиях сияний можно ожидать ухудшения навигационных измерений, а именно - существенного увеличения ошибок позиционирования. В отдельных случаях при высокой авроральной активности и в присутствии интенсивных различных форм сияний может оказаться невозможным определение координат потребителя.

Авторы благодарят шведский Институт космический физики за данные по полярным сияниям станции Кируна. Работа была выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-05-00570-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Meeren van der C., Oksavik K., Lorentzen D.A. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 10607.
- 2. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. // Косм. исслед. 2016. Т. 54. № 1. С. 23.
- 3. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C. et al. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 1307.
- 4. Prikryl P., Jayachandran P.T., Chadwick R., Kelly T.D. // Ann. Geophys. 2015. V. 33. P. 531.
- Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Thomas E.G. et al. // Ann. Geophys. 2015. V. 33. P. 637.
- 6. Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. // Space Weather. 2014. V. 12. P. 508.
- 7. Черноус С.А., Швец М.В. Филатов М.В. и др. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 10. С. 33.
- 8. Черноус С.А., Филатов М.В. Шагимуратов И.И., и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 5. С. 77.
- Козелов Б.В., Черноус С.А., Шагимуратов И.И. и др. // Proc. XLII Ann. Seminar "Physics of Auroral Phenomena" (Apatity, 2019). P. 48.
- Cherniak I.Yu., Zakharenkova I.E., Redmon R.J. // Space Weather. 2015. V. 13. P. 585.
- 11. Sieradzki R., Paziewski J. // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. Art. No. A5.
- 12. Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. // Sun Geosphere. 2018. V. 13. No. 1. P. 89.
- 13. Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. // Proc. 9th Workshop Sunny Beach (Bulgaria, 2017). P. 86.
- 14. *Kouba J., Héroux P. //* GPS Solutions. 2001. V. 5. No. 2. P. 12.
- 15. Jacobsen K.S., Dähnn M. // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4. Art. No. A27.
- Smith A.M., Mitchell C.N., Watson R.J. et al. // Space Weather. 2008. V. 6. Art. No. S03.
- Черноус С.А., Шагимуратов И.И., Филатов М.В. и др. // Сб. тр. Всеросс. конф. "Гелиофизические исследования в Арктике". (Мурманск, 2016). С. 70.
- Черноус С.А. Филатов М.В., Шагимуратов И.И., Ефишов И.И. // Вестн. Кольск. НЦ РАН. 2018. Т. 10. № 3. С. 106.
- 19. Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е. и др. // Совр. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. № 13(1). С. 197.
- 20. Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L. // Space Weather Space Clim. 2016. V. 6. Art. No. A9.

Occurrence of phase fluctuations and discrete auroral form and their impact on the GPS positioning errors during auroral disturbance on September 27, 2019

I. I. Shagimuratiov^{a, *}, M. V. Filatov^b, I. I. Efishov^a, I. E. Zakharenkova^a, N. Yu. Tepenitsyna^a

^aInstitute of Terrestrial magnetism, Ionosphere and Radio wave propagation of the Russian Academy, West Department, Kaliningrad, 236035 Russia

^bPolar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia *e-mail: shagimuratov@mail.ru

The analysis of occurrence fluctuations of navigation signals and positioning errors in Arctic due to auroral disturbance of September 27, 2019 is presented. During this event the anomaly positioning errors over European auroral stations were detected. We suppose that the strong errors due to crossing of signals of the discrete auroral form.

439