

УДК 550.338.2

ФЛУКТУАЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НАД ЕВРОПОЙ В МАРТЕ 2015 ГОДА

© 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 имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Калининград, Россия

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия

*E-mail: shagimurатов@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Выполнен анализ проявления флуктуаций навигационных сигналов, ошибок позиционирования и их связи с авроральными возмущениями, наблюдавшимися в марте 2015 г. На основе PPP (precise point positioning) алгоритма для кинематического режима во время бури 17 марта 2015 г. были выявлены аномально большие ошибки позиционирования навигационных измерений на европейских авроральных, субавроральных и среднеширотных станциях.

DOI: 10.31857/S036767652203022X

ВВЕДЕНИЕ

Навигационные сигналы при их трансионосферном прохождении через высокоширотную ионосферу испытывают фазовые и амплитудные флуктуации, которые обусловлены эффектами рефракции и дифракции на ионосферных неоднородностях [1]. Интенсивные флуктуации часто наблюдаются на авроральных и субавроральных широтах. Флуктуации могут вызывать сбои навигационных сигналов [2], скачки фазы [3] и в конечном итоге могут приводить к нарушениям работы навигационных систем. Фазовые флуктуации более чувствительны к проявлению неоднородностей, чем амплитудные. Медленные флуктуации, обусловленные рефракцией сигналов на крупномасштабных неоднородностях, характеризуют флуктуации полного электронного содержания (ТЕС, total electron content) вдоль луча спутник-приемник. Стандартные ГЛОНАСС/GPS наблюдения с 30 с интервалом обеспечивают выделение медленных флуктуаций по фазовым измерениям. Как показывают исследования, медленные флуктуации (далее флуктуации) наиболее сильно могут влиять на точность навигационных измерений.

Пространственно-временное поведение фазовых флуктуаций ассоциируется с динамикой аврорального овала [4, 5]. Флуктуации, обусловленные авроральными возмущениями, и их воздействие на навигационные сигналы в последние

время вызывают большой интерес [6–9]. В работах [10–12] выявлена связь фазовых флуктуаций с полярными сияниями, которые наблюдались во время авроральных возмущений. Показано, что при прохождении навигационного сигнала через полярные сияния усиливается интенсивность флуктуаций. Как следствие, существенно возрастают ошибки позиционирования. В работе [13] выявлена положительная корреляция между яркостью сияний и сцинтилляциями GPS сигналов. В работе [14] показано, что применение адаптивных итерационных алгоритмов позволяет существенно компенсировать ошибки позиционирования по сравнению со штатными алгоритмами. При этом отмечена важность оптимального выбора рабочего созвездия спутников при использовании этого алгоритма.

Во время геомагнитных возмущений интенсивность флуктуаций существенно возрастает, что приводит к увеличению погрешности навигационных измерений [15, 16]. Большой интерес вызвала самая сильная геомагнитная буря 24 цикла – 17 марта 2015 года, когда полярные сияния наблюдались на широтах 50°–60° [17]. По GPS наблюдениям более 2500 станций представлена картина глобального распределения неоднородностей во время бури 17 марта [18]. По GPS наблюдениям над Норвегией показана связь фазовых флуктуаций и ошибок позиционирования, которые значительно увеличивались во время

Таблица 1. Координаты GPS станций, наблюдения которых использованы в данной работе

Станция	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты		MLT для полуночи
	широта, градусы	долгота, градусы	широта, градусы	долгота, градусы	
NYA1	78.9	11.9	76.6	109.4	21.12
TRO1	69.7	18.9	66.9	102.2	21.54
VAAS	63.0	21.8	59.8	112.6	20.84
KLGI	54.7	20.5	50.9	112.6	21.88

Примечание. Код KLG1 соответствует станции Калининград.

этой бури [17]. В работе [19] на большом статистическом материале представлен анализ в планетарном масштабе 3D-ошибок позиционирования 17–18 марта 2015 г.

В данной работе дан детальный анализ – день ото дня – вариаций интенсивности ТЕС флуктуаций и их связи с авроральной возмущенностью в течение марта 2015 г. Отдельное внимание уделено буре 17–18 марта, во время которой наблюдалась интенсивная авроральная возмущенность, а *AE* индекс достигал максимальной величины (2000 нТл). Для этого периода дан детальный анализ поведения 3D-ошибок позиционирования на авроральных, субавроральных и средних широтах на конкретных станциях для европейского региона. Дана оценка максимальных ошибок позиционирования, которых можно ожидать в периоды сильных авроральных возмущений. Это особенно важно для навигации в Арктике.

МЕТОДОЛОГИЯ

В качестве исходных данных служили стандартные 30 с двухчастотные измерения. Привлекались GPS наблюдения авроральных, субавроральных и среднеширотных станций, расположенных около 20° в. д. Таблица 1 содержит информацию о географических, скорректированных геомагнитных координатах и местное время магнитной полуночи GPS станций используемых в работе станций. В качестве меры флуктуационной активности использована скорость изменения вертикального электронного содержания ионосферы – *TEC* на 1 мин интервале – *ROT* (rate of TEC). Единица измерения *ROT* – TECU/мин: 1 TECU = 10¹⁶ электрон/м². Общепринято интенсивность флуктуаций оценивать через индекс *ROTI* [20]:

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

Индекс характеризует дисперсию параметра *ROT*. Параметр *ROTI* рассчитывался для углов возвышения спутников выше 20 град. Авроральная активность оценивалась *AE* индексом (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

В последнее время повышаются требования к точности навигационных GPS/ГЛОНАСС измерений. В настоящее время разработаны методы и

алгоритмы определения координат потребителя с точностью до сантиметров по измерениям одного приемника, не привлекая измерения опорных станций PPP (precise point positioning). В PPP алгоритме учитываются все факторы, которые влияют на точность определения координат местоположения приемника. Мы анализировали связь между интенсивностью ТЕС флуктуаций и ошибками позиционирования, используя GIPSY программу NASA Jet Propulsion Laboratory (<http://apps.gdgps.net>). Для этих целей определялись 3D-ошибки (*P_{3D}*):

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

где *x₀*, *y₀*, *z₀* – осредненные координаты точки наблюдения. Ошибки определялись с 5 мин интервалом в кинематическом режиме. Для выбранного интервала при решении навигационной задачи включаются 30 с измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Связь AE индекса с интенсивностью флуктуаций (ROTI)

В целом наблюдается положительная связь между *AE* индексом и *ROTI*. Это особенно хорошо проявляется для интенсивных авроральных возмущений, при *AE* > 600–700 нТл, как это регистрировалось для бури 17 марта [19]. Мы провели анализ связи между этими параметрами по станции Тромсё за период 1–31 марта 2015 г. Использовались ТЕС измерения по всем пролетам спутников над станцией наблюдения. Индекс *AE* рассчитывался как среднее на 5 мин интервале. Величина индекса изменялась от минимального значения 15 нТл во время геомагнитно-спокойных условий до 2000 нТл во время бури 17 марта 2015 г. В течение марта 2015 флуктуации слабой и умеренной интенсивности практически регистрировались ежедневно. В 26 из 31 случаев флуктуации регистрировались вблизи местной магнитной полуночи (MLT). Флуктуации в утренние часы наблюдались в 10 случаях. На рис. 1 представлена статистика зависимости интенсивности флуктуаций от индекса авроральной возмущенности. Индекс *ROTI* рассчитывался как среднее по числу спутников, видимых над станцией.

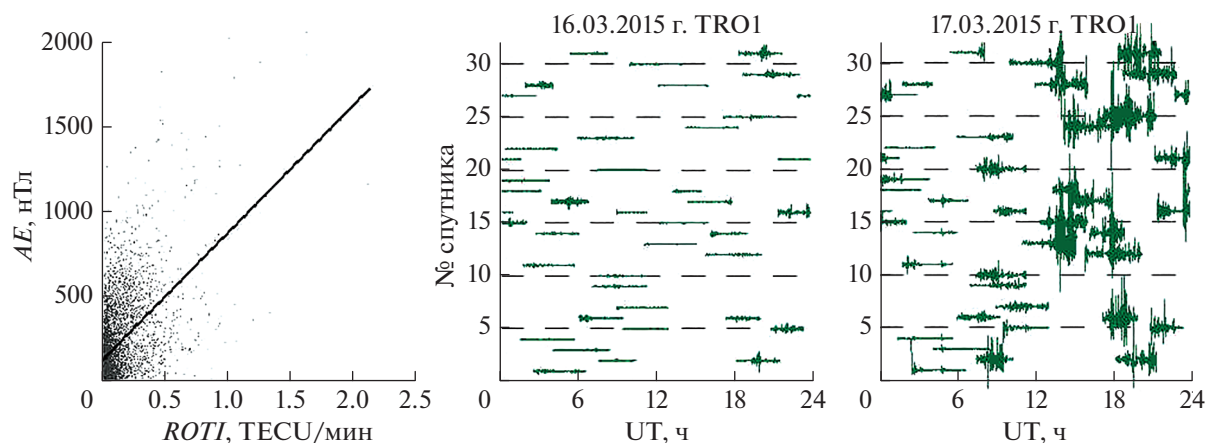


Рис. 1. Статистика зависимости $ROTI$ от AE индекса по станции Тромсё (прямая линия показывает линейную зависимость данных) и вариации ROT по всем пролетам спутников (карта пролетов) для спокойного и возмущенного дней.

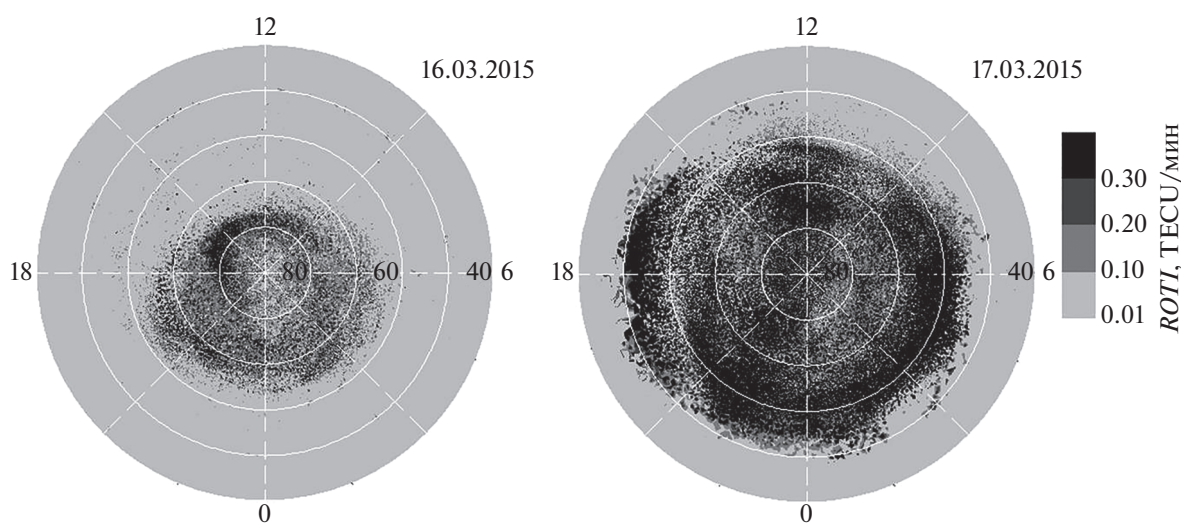


Рис. 2. Овал неоднородностей для спокойного (16 марта) и возмущенного (17 марта) дней.

Картина свидетельствует о значительном разбросе измерений. При построении статистической зависимости преобладающие значения AE индекса в марте составляли менее 100–300 нТл, при этом коэффициент корреляции не превышал 0.5. В то же время, для бури 17 марта, при сильной авроральной возмущенности ($AE > 500$ нТл), была зарегистрирована высокая степень соответствия между этими параметрами. Детальный анализ показал, что даже при минимальной степени авроральной возмущенности на станции TRO1 регистрировались ТЕС флуктуации слабой интенсивности, в частности, 5, 9, 12, 13, 16 марта 2015 г. Для выяснения такого поведения флуктуаций анализировалась динамика пространственно-временного распределения ионосферных неоднородностей для соответствующих дней. Как отмечалось выше, ионосферные неоднородности могут быть охарактеризованы индексом $ROTI$, который характеризует интенсивность фазовых флуктуаций GPS сигнала и позволяет детектиро-

вать наличие ионосферных неоднородностей. Пространственное распределение неоднородностей строилось по расчетам $ROTI$ на основе ТЕС измерений по всем GPS станциям, расположенным в северном полушарии на широтах выше 55° с. ш. В координатах исправленная геомагнитная широта (CGL, corrected geomagnetic latitude) – местное магнитное время (MLT) распределение представляется в виде овала. Подобно авроральному овалу он носит название овала неоднородностей [4, 21]. Овал расширяется к полюсу и к экватору с увеличением магнитной активности, что четко демонстрирует рис. 2.

Ранее была получена структура и динамика овала неоднородностей и аврорального овала для различных геофизических условий [5]. В этой работе показано, что наблюдается хорошее соответствие положений аврорального овала и овала неоднородностей. Как видно на рисунке в спокойный день овал неоднородностей сужается, но сохраняет свою структуру. Экваториальная гра-

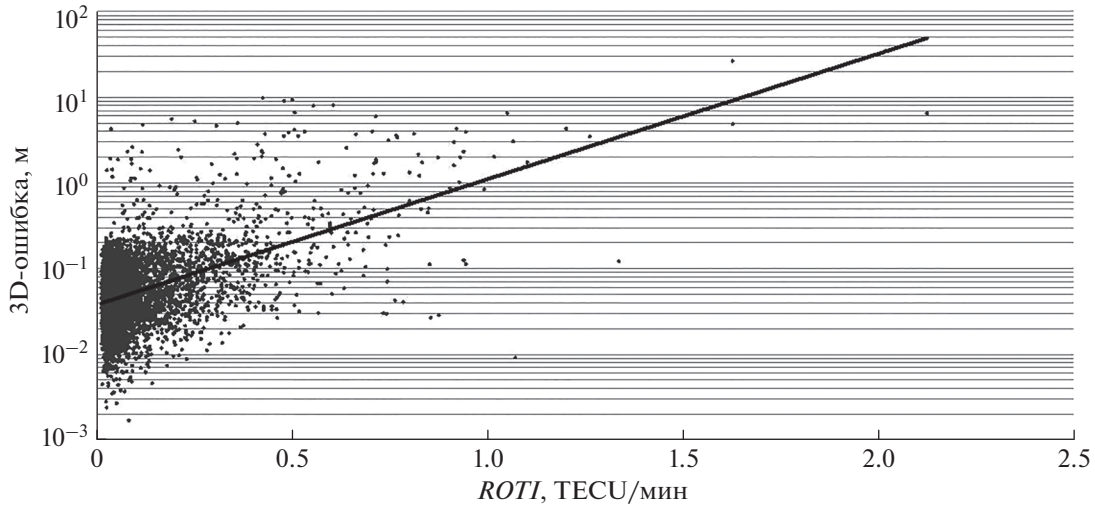


Рис. 3. Зависимость 3D-ошибок от интенсивности флуктуаций (*ROTI*). Прямая линия показывает экспоненциальную зависимость данных.

ница овала неоднородностей 16 марта располагалась на широте около 60° – 65° . Это согласуется с данными по флуктуациям, которые регистрировались по станции TRO1, при спокойных условиях (рис. 1). Анализ фазовых флуктуаций показал, что во время бури 17 марта интенсивность флуктуаций драматически увеличивалась на всех рассматриваемых станциях. Овал неоднородностей расширился вплоть до широт 50° – 54° .

Анализ ошибок позиционирования

Для нахождения ошибок позиционирования использовался алгоритм PPP для кинематического режима. На рис. 3 представлена статистика зависимости 3D-ошибок от интенсивности флуктуаций по станции Тромсё.

Здесь приведен индекс *ROTI*, который рассчитывался как среднее *ROTI* по всем пролетам спутников, видимых над станцией наблюдения за конкретный 5 мин интервал. Коэффициент корреляции составил 0.61. В течение рассматриваемого периода наиболее спокойные дни регистрировались 5, 9, 12, 13 и 16 марта. Анализ показал, что в эти дни среднемесячные ошибки по станции Тромсё не превышали 4–5 см. Максимальные ошибки при этом в отдельные периоды времени не превышали 0.3 м.

Хорошо известно, что на высоких широтах ошибки позиционирования существенно возрастают в периоды геомагнитных возмущений. Нам представлялось наиболее интересным провести анализ ошибок в Арктике для возмущенного дня 17 марта. На рис. 4 представлено сравнение поведения *AE* индекса и 3D-ошибок на рассматриваемых станциях для 16 и 17 марта.

Во время бури ошибки позиционирования значительно возросли по сравнению со спокойным

днем. По данным одночастотных наблюдений на высокоширотных станциях в американском и азиатском секторах за 17–18 марта 2015 г. выявлено увеличение ошибок в 5–7 раз [22]. Этот результат важен для одночастотных потребителей, поскольку одночастотные приемники широко используются на практике. По GPS наблюдениям над Норвегией на широтах 60° – 70° выявлена сильная зависимость вертикальной ошибки позиционирования от величины *ROTI* во время бури. В частности, выявлена высокая динамика эффектов ионосферных возмущений, которая обуславливает существенные кратковременные ошибки определения координат [18].

В работе [23] показано, что ухудшение точности позиционирования обусловлено прохождением перемещающихся ионосферных возмущений. Эти результаты касаются наблюдений на среднеширотных станциях. Увеличение ошибок регистрировалось около 16–17 UT. Что касается наших результатов, то на среднеширотной станции Калининград максимальные ошибки позиционирования по времени наблюдались в период усиления флуктуаций в узком временном интервале 15–16 UT. Это свидетельствует о том, что увеличение ошибок обусловлено именно проявлением флуктуаций, которые, как показал анализ, регистрировались на не менее 4 спутниковых пролетах. Как видно на рис. 2, экваториальная граница овала неоднородностей опускалась до широт около 50° – 55° . Во время бури 22 июня 2015 г. выявлено увеличение PPP ошибок на средних широтах. Это увеличение было увязано с проявлением неоднородностей аврорального происхождения. Это еще раз подтверждает влияние флуктуации навигационных сигналов на увеличение ошибок позиционирования [6].

Ошибки 17 марта были на порядок выше по сравнению со спокойным днем 16 марта. Характер-

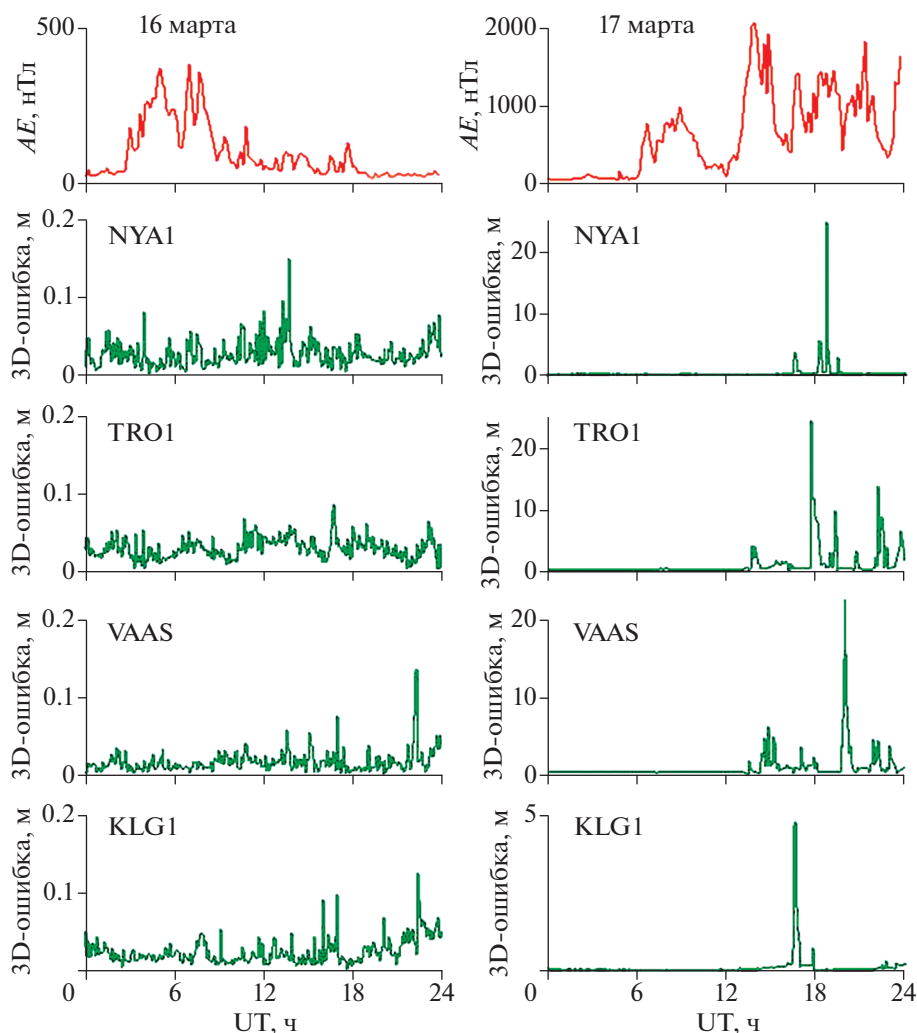


Рис. 4. Сравнение 3D-ошибок для спокойного (16 марта) и возмущенного (17 марта) дней на различных станциях.

но, что максимальные ошибки имеют кратковременный характер, как это проявилось в поведении вертикальной ошибки по GPS наблюдениям в Норвегии [18]. В нашем случае максимальные ошибки достигали 20–25 м на авроральных широтах. Это в целом согласуется с результатами работы [19]. В этой работе показано, что осредненные в планетарном масштабе ошибки превышали 10 м. На рис. 4 явно видно, что ошибки уменьшаются с широтой, но при этом даже на среднеширотной станции Калининград (KLG1) максимальная ошибка достигала 5 м. В целом на авроральных и субавроральных широтах увеличение ошибок наблюдается после 12–15 UT, в соответствии с временным развитием авроральной возмущенности (рис. 4).

На фоне общего роста ошибок во время бури выделяются кратковременные, в виде всплесков, большие 3D-ошибки. Это может быть обусловлено следующим обстоятельством. Известно, что точность позиционирования ухудшается с увеличением количества спутников, подвергающихся флуктуациям. На рис. 1 по станции TRO1 видно,

что как интенсивность, так и количество спутниковых пролетов, подвергшихся флуктуациям, драматически возросло во время бури по сравнению со спокойными условиями. Особенно ярко это проявилось на авроральных и субавроральных станциях. Флуктуации носят нерегулярный характер, поэтому одновременно число спутниковых пролетов, подверженных флуктуациям, может сильно варьироваться, что отражается на ошибках. Во временном поведении ошибок наблюдается существенный разброс от станции к станции. Мы полагаем, что такой разброс, в частности, может быть вызван проявлением сияний, которые наблюдались в период геомагнитной бури 17 марта. При прохождении навигационных сигналов через полярные сияния наблюдался даже сбой приема сигнала спутника [10]. В работе [12] показано, что при прохождении сигналов через области дискретных форм полярных сияний 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ вариаций фазовых флуктуаций GPS сигналов (ТЕС флуктуаций) и ошибок позиционирования в течение марта 2015 г. на авроральных, субавроральных и среднеширотных европейских станциях. Даже при спокойных геомагнитных условиях ($AE < 100$ нТл) слабые флуктуации регулярно регистрировались на авроральных станциях в районе магнитной полуночи. Во время экстремальной бури 17 марта, когда индекс авроральной возмущенности превышал 2000 нТл, интенсивность флуктуаций драматически увеличилась. Пространственно-временная динамика флуктуаций контролировалась по овалу неоднородностей. При спокойных условиях овал сужался, сохраняя свою структуру. Во время бури овал расширялся, его экваториальная граница достигала 50° – 55° .

Для расчета 3D-ошибок использовался PPP алгоритм. При спокойных условиях алгоритм обеспечил точность позиционирования около 5–20 см. Во время бури максимальные ошибки достигали 20–25 м. На средних широтах (ст. Калининград) ошибки превышали 4 м. Полученные результаты по оценке максимальных ошибок GPS/ГЛОНАСС позиционирования во время геомагнитных возмущений будут весьма полезны при осуществлении навигации в Арктическом регионе.

Авторы благодарят EUREF Permanent GNSS Network (EPN) за предоставление данных GPS наблюдений.

Работа была выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00570а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. // Space Weather. 2007. V. 5. No. 9. Art. No. S09003.
2. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Тутова М.А. // Косм. иссл. 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. Aarons. J. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102(A8). Art. No. 17219.
5. Черноус С.А., Шагимуратов И.И., Ивенко И.Б. и др. // Хим. физ. 2018. Т. 37. № 5. С. 77; Chernouss S.A., Shagimuratov I.I., Ivenko I.B. et al. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2018. V. 12. No. 3. P. 562.
6. Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K. et al. // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 1579.
7. Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. // Sun. Geosphere. 2018. V. 13. No. 1. P. 89.
8. Козелов Б.В., Черноус С.А., Шагимуратов И.И. и др. // Proc. XLII Ann. Seminar "Physics of Auroral Phenomena". (Apatity, 2019). P. 48.
9. Shagimuratov I.I., Chernouss S.A., Despirak I.V. et al. // Proc. XLII Ann. Seminar "Physics of Auroral Phenomena" (Apatity, 2019). P. 32.
10. Черноус С.А., Филатов М.В., Шагимуратов И.И., Ефишов И.И. // Вест. Кольск. НЦ РАН. 2018. Т. 10. № 3. С. 106.
11. Черноус С.А., Швец М.В., Филатов М.В. и др. // Хим. физ. 2015. Т. 34. № 10. С. 33; Chernouss S.A., Shvets M.V., Filatov M.V. et al. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2015. V. 9. No. 5. P. 778.
12. Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 427; Shagimuratov I.I., Filatov M.V., Efshov I.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 318.
13. Mushini S.C., Skone S., Spanswick E. et al. // Space Weather. 2018. V. 16. P. 838.
14. Кузьмичева М.Ю., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г. // Сб. науч. тр. ИДГ РАН. 2017. № 9. С. 136.
15. Jacobsen K.S., Dähnn M. // J. Space Weather Clim. 2014. V. 4. Art. No. A27.
16. Linty N., Minetto A., Dovis F., Spogli L. // Space Weather. 2018. V. 16. P. 1317.
17. Cherniak I.Yu., Zakharenkova I.E., Redmon R.J. // Space Weather. 2015. V. 13. No. 9. P. 585.
18. Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L. // J. Space Weather Clim. 2016. V. 6. Art. No. A9.
19. Yang Z., Morton Y., Zakharenkova I. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2020. V. 125. No. 7. Art. No. e2019JA027681.
20. Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. // J. Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. No. 18. P. 2283.
21. Shagimuratov I.I., Krankowski A., Efshov I.I. et al. // Earth Planets Space. 2012. V. 64. No. 6. P. 521.
22. Данильчук Е.И., Ясюкевич Ю.В., Ясюкевич А.С., Затолокин Д.А. // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из косм. 2021. Т. 18. № 1. С. 31.
23. Poniatowski M., Nykiel G. // Remote Sens. 2020. V. 12. No. 21. P. 3582.

Fluctuations of navigation signals and positioning errors over Europa during March 2015

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

^a Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Branch in Kaliningrad, Kaliningrad, 236035 Russia

^b Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: shagimuratov@mail.ru

The analysis of occurrence fluctuations of navigation signals, positioning errors and their relationship with auroral disturbances over Europe during March 2015 is presented. Based on the PPP algorithm for the kinematic mode during the storm on March 17, 2015, anomalously large positioning errors of navigation measurements at European auroral, subauroral and mid-latitude stations were detected.