

Научная статья
УДК 551.510.535
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.005

ВКЛАД ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ РАДАРом EISCAT, В СЦИНТИЛЛЯЦИИ GPS-СИГНАЛОВ

Владимир Борисович Белаховский¹, Ячи Джин², Милош Войцех³

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия, belakhov@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8994-4363>

^{2, 3}Университет Осло, Осло, Норвегия

²<https://orcid.org/0000-0002-0076-9579>

³<https://orcid.org/0000-0002-5202-750X>

Аннотация

Проведен анализ влияния ионосферных возмущений на GPS-сцинтилляции в области аврорального овала с использованием приемника на станции Шиботн, Норвегия (Skibotn — SKN, CGM — 66,28 с. ш., 103,41 в. д.). Параметры ионосферы определялись по данным радара UHF EISCAT. Проанализированы случаи за 2015–2022 гг., когда были доступны данные GPS и EISCAT. В работе представлены типичные события. Также использовались оптические наблюдения полярных сияний на станции SKN в спектральных линиях 557,7 и 630,0 нм. Показано, что наиболее сильные фазовые сцинтилляции GPS ($\sigma_f > 1$) вызывали ионосферные возмущения в E-области (100–120 км), эти возмущения сопровождались появлением дуг полярных сияний. Возмущения ионосферы в F-области (> 200 км) не вызывают значительных фазовых сцинтилляций. Ночные и вечерние суббури, сопровождаемые отрицательной магнитной бурей, вызывают наиболее сильные фазовые GPS-сцинтилляции. В то же время положительные магнитные бури, связанные с усилением восточного электрожета, во время магнитной бури создают фазовые сцинтилляции, сравнимые с ночными суббуриями. Заметного роста амплитудных сцинтилляций во время рассматриваемых событий не обнаружено.

Ключевые слова:

ионосфера, GPS-приемник, суббуря, радар некогерентного рассеяния, полярные сияния

Благодарности:

исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 18-77-10018.

Original article

THE CONTRIBUTION OF THE IONOSPHERIC DISTURBANCES REGISTERED BY EISCAT RADAR TO GPS SIGNAL SCINTILLATIONS

Vladimir Borisovich Belakhovsky¹, Yaqi Jin², Miloch Wojciech³

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia, belakhov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8994-4363>

^{2, 3}University of Oslo, Norway

²<https://orcid.org/0000-0002-0076-9579>

³<https://orcid.org/0000-0002-5202-750X>

Abstract

It is performed an analysis of the influence of ionosphere disturbances on GPS scintillations at the auroral oval using receiver at Skibotn station (SKN, CGM — 66.28N, 103.41E). The ionosphere parameters were determined using EISCAT UHF radar data. We analyze the events for the years 2015–2022 when the GPS and EISCAT data were available. In this paper we present typical events. The optical aurora observations at Skibotn stations in 557.7 and 630.0nm spectrum lines were used as well. It is shown that the strongest GPS phase scintillations ($\sigma_f > 1$) were produced by the ionosphere disturbances in the E-region (100–120 km), these disturbances were accompanied by the appearance of the auroral arcs. Ionosphere disturbances in the F-region (> 200 km) do not produce any significant phase scintillations. The night-time and evening substorms accompanied by the negative magnetic bay produce strongest GPS phase scintillations. At the same time, positive magnetic bays, associated with the growth of the eastern electrojet, during magnetic storm produce comparable phase scintillation as night-time substorms. We did not find a clear growth of the amplitude scintillations during considered events.

Keywords:

ionosphere, GPS receiver, substorm, incoherent scatter radar, aurora

Acknowledgments:

the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation 18-77-10018 (VB).

Введение

Ионосфера как среда распространения радиоволн может отражать, поглощать и приводить к рассеянию радиоволн различных частотных диапазонов. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) такие, как GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou, очень важны для развития современной цивилизации.

Неоднородности в распределении ионосферной плазмы снижают качество трансionoсферных сигналов ГНСС. Наличие неоднородностей характерно прежде всего для высокоширотной и экваториальной ионосферы. Глобальная система позиционирования (GPS) в обычном режиме использует две частоты L -диапазона, то есть $L1 = 1575,42$ МГц и $L2 = 1227,60$ МГц.

Быстрые колебания амплитуды и фазы сигнала называются ионосферными сцинтилляциями (или мерцаниями) (Basu et al., 2002). Сильные сцинтилляции даже приводят к потере сигнала. Уровень возмущенности сигнала характеризуется фазовым (σ_f) и амплитудным (S_4) индексами сцинтилляций. Амплитудные сцинтилляции вызываются ионосферными плазменными неоднородностями с размерами от десятков до сотен метров, а фазовые — неоднородностями с размерами от сотен метров до нескольких километров (Basu et al., 2002, Kintner et al., 2007). Вариации полного электронного содержания (ПЭС) — ROT (rate of TEC), определяемые по сигналам GPS, также характеризуют состояние ионосферы.

Наиболее мощным возмущением в авроральной зоне является суббуря. Во время суббури большое количество энергии, накопленное в хвосте магнитосферы, выбрасывается в атмосферу Земли, приводя к ионизации, росту ионосферных неоднородностей, появлению ярких полярных сияний, росту ионосферных токов и т. д. (McPherron et al., 1986). Западный электроджет проходит через утренний и полуночный сектор и создает отрицательные бухты в геомагнитном поле. Восточный электроджет течет в дневном секторе и создает положительные бухты в геомагнитном поле. Установлено, что усиление GPS-сцинтилляций коррелирует с появлением дискретных авроральных форм во время суббурь (Prikryl et al., 2010).

Событие SSC (внезапное начало бури) вызвано воздействием межпланетного магнитного облака, создаваемого корональным выбросом массы (CME), с магнитосферой Земли. В работах (Jin et al., 2016, Belakhovsky et al., 2017) показано, что событие SSC приводит к увеличению ПЭС в разных секторах местного времени. В работе (Jin et al., 2018) авторы обнаружили, что событие SSC во время экстремальной магнитной бури 17 марта 2015 г. даже привело к небольшому росту амплитудных сцинтилляций.

В серии наших недавних работ (Belakhovsky et al., 2020; Belakhovsky et al., 2021; Белаховский и др., 2022) мы исследовали влияние возмущений полярной ионосферы на GPS-сцинтилляции по наблюдениям на арх. Шпицберген. Архипелаг Шпицберген в различные моменты может располагаться в каспе, в авроральном овале или в полярной шапке. В работе проводилось сравнение вклада высыпаний в области каспа, «патчей» полярной шапки (polar cap patches — PCPs), суббуревых высыпаний, SSC-событий в рост GPS-сцинтилляций. Было показано, что суббуревые высыпания проводят к наиболее сильным фазовым GPS-сцинтилляциям (Belakhovsky et al., 2021). На дневной стороне PCPs могут создавать более сильные фазовые сцинтилляции, чем касповые высыпания (Белаховский и др., 2022). В данной работе мы проводим аналогичный анализ для экваториальной части аврорального овала с наблюдениями в Скандинавии (станция Skibotn). Данный регион имеет большое значение для изучения космической погоды, так как является более населенным.

Для аврорального овала характерен высокий уровень турбулентности ионосферной плазмы. Например, наибольшее количество сбоев при определении ПЭС в периоды геомагнитных бурь наблюдается вблизи аврорального овала.

Цель данной работы — выяснить, какие типы ионосферных и геомагнитных возмущений (ночные, вечерние суббури, положительные магнитные бухты, возмущения в F -области ионосферы, события SSC) вызывают наиболее сильные сцинтилляции GPS-сигналов в области аврорального овала.

Используемые данные

Был использован сцинтилляционный GPS-приемник (GISTM, модель GSV4004B) (Van Dierendonck et al., 1993) университета Осло (UiO), установленный на станции Skibotn (SKN, CGM — 66,28N, 103,41E). Частота дискретизации — 50 Гц. Фазовый (σ_f) и амплитудный индексы сцинтилляций (S_4) рассчитываются автоматически. Фазовый индекс сцинтилляций определяется как стандартное отклонение фазы несущей, из которой была удалена с помощью высокочастотного фильтра Баттерворта шестого порядка низкочастотная составляющая (0,1 Гц). Амплитудный индекс сцинтилляций (S_4) определяется как стандартное отклонение мощности принимаемого сигнала, нормированное на среднюю мощность сигнала за 1-минутные периоды. Данные GPS TEC были рассчитаны с помощью WinTEC-P (Carrano et al., 2009).

Данные радаров UHF EISCAT использовались для регистрации возмущений в *E*- и *F*-областях ионосферы. Луч радара UHF EISCAT был направлен вдоль геомагнитного поля (угол места — 77°, азимутальный угол — 185°).

Использовались оптические наблюдения полярных сияний (камера всего неба — ASI) в линиях 557,7 и 630,0 нм на станции SKN.

Для характеристики вариаций геомагнитного поля использовались магнитометры сети IMAGE. Станции, используемые в данном исследовании, имеют следующие географические и скорректированные геомагнитные (CGM) координаты: Тромсё (TRO) — (69,66° с. ш., 18,94° в. д.), (66,64° с. ш., 102,90° в. д.); Скиботн (SKN) — (69,43° с. ш., 20,38° в. д.), (66,28° с. ш., 103,41° в. д.).

Данные базы OMNI использовались для характеристики параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП).

Анализ данных

Был выполнен анализ событий за 2015–2022 гг., когда были одновременно доступны данные GPS-приемника и радара EISCAT (около 150 событий). В статье представлено несколько типов геомагнитных, ионосферных возмущений: суббури, CIR магнитная буря, CME магнитная буря, возмущения в *F*-области ионосферы.

Суббуря

Представлено событие 26 января 2022 г. Это было в период восстановительной фазы слабых геомагнитных возмущений, начавшихся 25 января 2022 г. (с индексом SYM-H, равным –40 нТл). Скорость солнечного ветра превышала 500 км/с. 25 января 2022 г. скачки плотности солнечного ветра превышали 50 см^{–3}, Vz-компонента ММП часто меняла знак.

Суббуря длилась с 20 до 22:30 UT и выглядела, как пилообразные события (sawtooth events) с несколькими отрицательными бухтами (рис. 1). Амплитуда наиболее сильной отрицательной бухты составила более 400 нТл.

Было зафиксировано три скачка фазового индекса сцинтилляций: в 20:00, 22:30, 21:30 UT с $\sigma_f = 1–1,5$ рад. Эти фазовые сцинтилляции сопровождалось увеличением плотности в *E*-области ионосферы (100–120 км) по данным радара UHF EISCAT (рис. 1, верхняя панель). Плотность ионосферы возрастает от $1 \cdot 10^{11}$ до $5 \cdot 10^{11}$ см^{–3} на высоте 120 км (рис. 1, панель 2).

Сравнение амплитуды геомагнитной возмущенности (*X*-компоненты) с фазовыми GPS-сцинтилляциями показывает, что даже меньшие геомагнитные возмущения могут приводить к более сильным фазовым сцинтилляциям. См., например, временной интервал 20–22 UT.

Фазовые сцинтилляции также сопровождалось значительным ростом вариаций ROT (5 TECU/мин) (рис. 1, нижняя панель). Роста индекса S_4 во время рассмотренных возмущений не наблюдается (рис. 1, панель 5).

Таким образом, анализ данных радара UHF EISCAT показывает, что наиболее сильные фазовые GPS-сцинтилляции ($\sigma_f > 1$), наблюдавшиеся во время ночной суббури, вызваны увеличением плотности ионосферы в *E*-области.

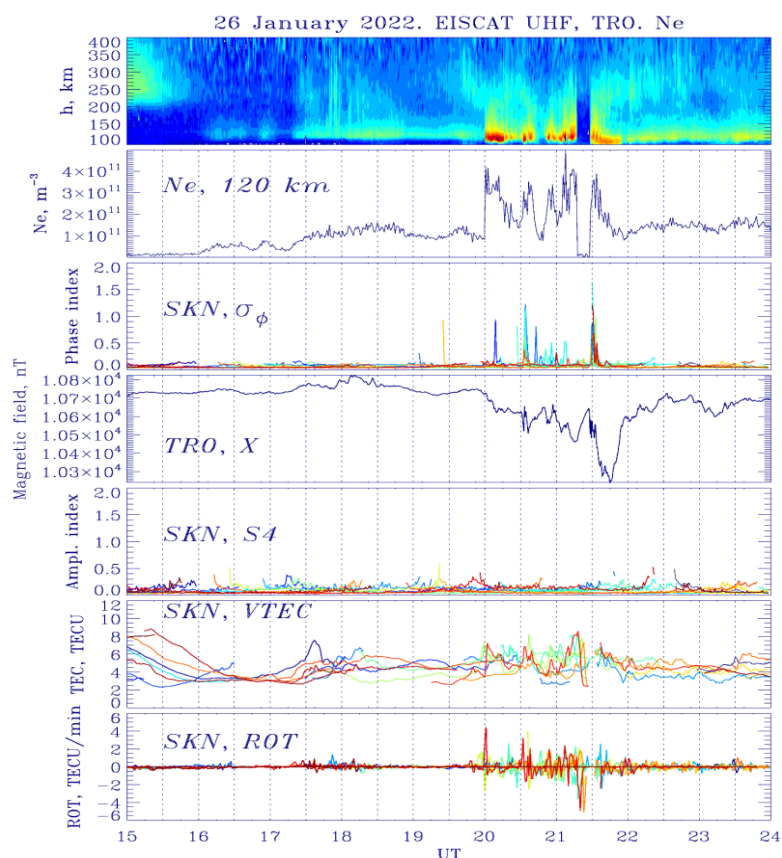


Рис. 1. X-компонента геомагнитного поля на станции TRO; фазовый индекс сцинтилляций, амплитудный индекс сцинтилляций, вертикальное полное электронное содержание (VTEC), скорость изменения ПЭС (ROT) по данным GPS-приемника на станции SKN 22 января 2022 г. в 15:00–24:00 UT

CIR магнитная буря

Рассмотрено событие 27 октября 2016 г. Это была восстановительная фаза геомагнитной бури, начавшейся 25 октября и вызванной CIR (коротирующей областью взаимодействия). Скорость солнечного ветра достигает значения 780 км/с, плотность протонов — 45 см^{-3} , индекс SYM-H = -80 нТл .

Амплитуда суббури (отрицательная магнитная бухта), зарегистрированной в 15–18 UT (то есть 18–21 MLT) на станции TRO, достигает значения около 900 нТл в X-компоненте. Из данных радара EISCAT видно, что основные возмущения ионосферы происходят на высотах 100–130 км, то есть в E-области ионосферы. На высоте 120 км скачок Ne составляет от $1 \cdot 10^{11}$ до $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2, вторая панель).

Заметный рост $\sigma_f > 1$ в 15–18 UT совпадает с ростом электронной концентрации ионосферы (рис. 1). Фазовые сцинтилляции также сопровождались значительным ростом вариаций ROT (5 TECU/мин).

Сравнение амплитуды геомагнитной возмущенности с σ_f показывает, что даже меньшая геомагнитная возмущенность может приводить к более сильным фазовым сцинтилляциям. См., например, временной интервал 15–17 UT, X-компонента геомагнитного поля.

Рост σ_f совпадает с появлением авроральных дуг, наблюдаемых камерой всего неба на станции SKN (рис. 3). Это подтверждает значительную роль суббуревых авроральных дуг в формировании сильных фазовых сцинтилляций. При этом основной вклад в рост σ_f вносят ионосферные возмущения в E-области.

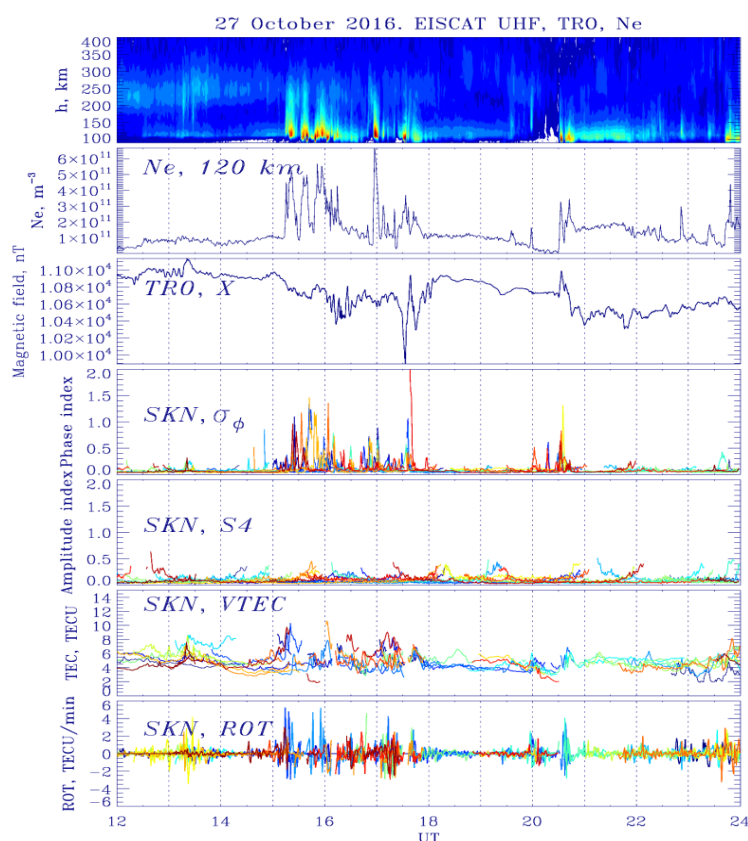


Рис. 2. X-компонента геомагнитного поля на станции TRO; фазовый индекс сцинтилляций, амплитудный индекс сцинтилляций, вертикальное полное электронное содержание (VTEC), скорость изменения ПЭС (ROT) по данным GPS-приемника на станции SKN 27 октября 2016 г. в 12:00–24:00 UT

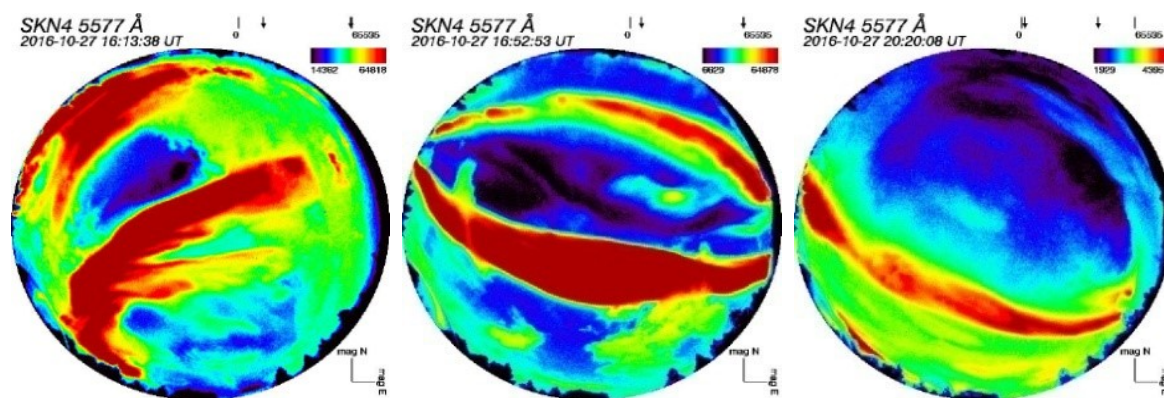


Рис. 3. Полярные сияния по данным камеры всего неба в обсерватории SKN 27 октября 2016 г. в 16:13 UT (левое изображение), в 16:52 UT (центральное изображение), в 20:20 UT (правое изображение)

Возмущения в F -области ионосферы

Рассмотрено событие 12 февраля 2015 г. Во время данного события не наблюдалось геомагнитной бури ($SUM-H = -10$ нТл), АЕ-индекс достигал значения 500 нТл. Скорость солнечного ветра имела низкие значения ($V \approx 360$ км/с), но B_z -компонента ММП в течение длительного времени (10–20 UT) имела отрицательные значения и достигала значения около $-5,5$ нТл. Плотность протонов солнечного ветра была равна примерно 7 см $^{-3}$ и не имела значительных скачков.

Повышение плотности ионосферы в F -области (> 200 км) было зарегистрировано с 17 по 21 UT радаром UHF EISCAT (рис. 4). Концентрация электронов увеличилась на высоте 283 км с $1,5 \cdot 10^{11}$ до $3,5 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$. Этот рост концентрации ионосферы не сопровождался увеличением σ_{ϕ} . Значимых возмущений X -компоненты геомагнитного поля, возмущений ПЭС, ROT, σ_{ϕ} (рис. 4) во время этих ионосферных возмущений также не наблюдалось. По наблюдениям на EISCAT 42m (Шпицберген) в этот же интервал времени наблюдались PCPs на полярных широтах (не показано на рисунках). Следовательно, рассматриваемые ионосферные возмущения вблизи SKN являются проявлением PCPs в экваториальной части аврорального овала.

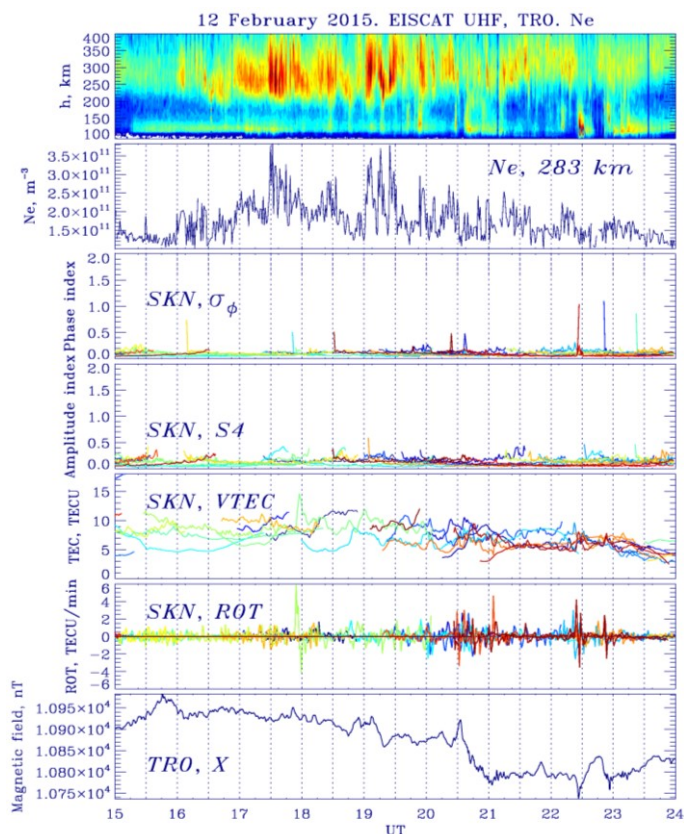


Рис. 4. X -компонента геомагнитного поля на станции TRO; фазовый индекс сцинтилляций, амплитудный индекс сцинтилляций, вертикальное полное электронное содержание (VTEC), скорость изменения ПЭС (ROT) по данным GPS-приемника на станции SKN 12 февраля 2015 г. в 15:00–24:00 UT

Таким образом, анализ показывает, что возмущения F -области ионосферы не вызывают значительных фазовых сцинтилляций в экваториальной части аврорального овала.

СМЕ магнитная буря

Рассмотрено воздействие геомагнитных возмущений во время СМЕ (coronal mass ejection) магнитной бури на сцинтилляции GPS-сигналов на станции SKN. SSC-импульс (внезапное начало бури) вызван взаимодействием межпланетной ударной волны с магнитосферой Земли. Положительные магнитные бухты в дневном секторе вызваны усилением восточного аврорального электроджета в дневном секторе.

Рассмотрена геомагнитная буря 7 января 2015 г. Это была достаточно сильная геомагнитная буря ($\text{SYM-H} = -137$ нТл), индекс AE достиг значения около 2000 нТл. Событие SSC было зарегистрировано примерно в 06:30 UT как ступенчатое увеличение индекса SYM-H из-за увеличения плотности солнечного ветра (рис. 5). B_z -компонента ММП во время главной фазы геомагнитной бури достигает значения -20 нТл. Скорость солнечного ветра имела средние значения — около 480 км/с.

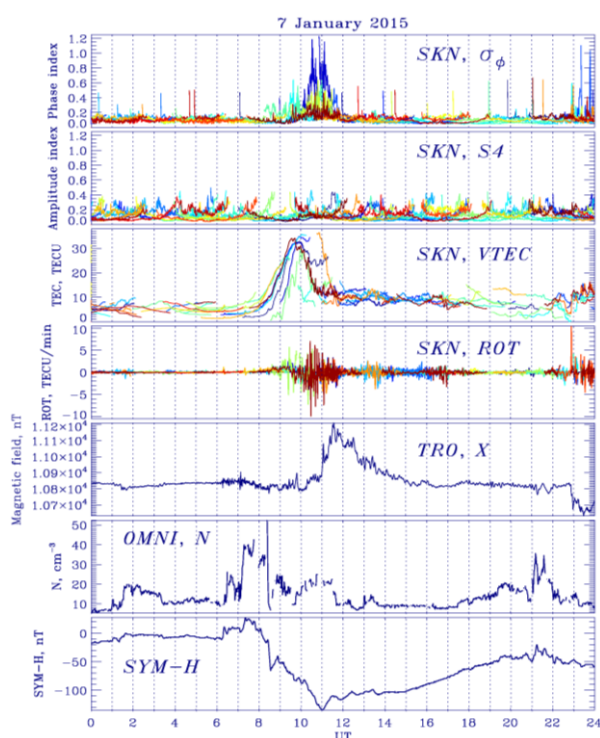


Рис. 5. Фазовый и амплитудный индекс цинтилляций, вертикальное полное электронное содержание (VTEC), скорость TEC (ROT) по данным GPS-приемника на станции SKN; X-компонента геомагнитного поля на станции TRO; плотность солнечного ветра из базы данных OMNI; SYM-H-индекс на 7 января 2015 г.

Для всех событий SSC за анализируемый интервал времени (2015–2022 гг.) не было данных радара EISCAT, когда были также доступны данные GPS-приемника на станции SKN.

Событие SSC 7 января 2015 г. не приводит к значительным фазовым и амплитудным сцинтилляциям. Положительная бухта в магн. поле длилась с 10 до 15 UT (13–18 MLT) и имела амплитуду в X-компоненте около 400 нТл на станции TRO (рис. 5). Положительная магнитная бухта вызывает значительное увеличение фазовых сцинтилляций ($\sigma_\phi = 1,2$ рад), ПЭС (от 10 до 38 TECU), ROT (до 11 TECU/мин) (рис. 5). Не обнаружено роста амплитудных фазовых сцинтилляций во время рассматриваемого события.

В 23 UT на станции TRO наблюдалась ночная суббура меньшей амплитуды ($\Delta X = 200$ нТл) (рис. 5). Эта суббура дает не столь интенсивное увеличение ПЭС (от 10 до 15 TECU), ROT (до 5 TECU/мин), σ_ϕ (0,6–1 рад). Амплитуда ночной суббуры была меньше амплитуды дневной положительной бухты (рис. 5, панель 5). Таким образом показано, что положительные магнитные бухты в дневном секторе во время магнитных бурь приводят к вполне сравнимому росту фазовых сцинтилляций, как ночные и вечерние суббуры.

Заключение

Анализ данных GPS-сцинтилляций на станции SKN (за 2015–2022 гг.) показал, что в области аврорального овала наиболее сильные GPS-сцинтилляции ($\sigma_\phi > 1$) развивались во время суббурь, сопровождавшихся отрицательными бухтами геомагнитного поля. Возмущения ионосферы во время этих суббурь в основном происходят в E-области (100–120 км), как видно из данных радара UHF EISCAT. Оптические наблюдения на станции SKN показывают, что сильные GPS-сцинтилляции сопровождались появлением авроральных дуг. Уровень фазовых сцинтилляций во время события SSC существенно ниже, чем во время суббури. Возмущения ионосферы в F-области (> 200 км) не вызывают значительных фазовых сцинтилляций. Положительные магнитные бухты, возникающие во время магнитных бурь, приводят к фазовым сцинтилляциям, сравнимым по значениям с ночными и вечерними суббурами ($\sigma_\phi > 1$). Уровень фазовых сцинтилляций не всегда пропорционален амплитуде возмущения геомагнитного поля, то есть меньшее геомагнитное возмущение может приводить к более сильным фазовым сцинтилляциям. Явного роста амплитудных сцинтилляций (S_4) во время рассматриваемых событий не обнаружено.

Список источников

1. Белаховский В. Б., Джин Я., Милош В. Дневные сцинтилляции GPS-сигналов по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86, № 3. С. 428–433.
2. Basu S., Groves K. M., Basu S., and Sultan P. J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2022, V. 64, pp. 1745–1754.
3. Belakhovsky V. B., Pilipenko V. A., Sakharov Y. A., Lorentzen D. L., and Samsonov S. N. Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. Earth Planets Space, 2017, V. 69, p. 105.
4. Belakhovsky V. B., Jin Y., Miloch W. J. Influence of different ionospheric disturbances on the GPS scintillations at high latitudes. Problems of Geocosmos — 2018. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2020, pp. 281–287.
5. 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, pp. 687–700.
6. Carrano C. S., Anghel A., Quinn R. A., and Groves K. M. Kalman filter estimation of plasmaspheric total electron content using GPS. Radio Sci., 2009, V. 44, p. RS0A10.
7. Jin Y., Zhou X., Moen J. I., Hairston M. The auroral ionosphere TEC response to an interplanetary shock. Geophys. Res. Lett., 2016, V. 43, Is. 5, pp. 1810–1818.
8. Jin Y. and Oksavik K. GPS scintillations and losses of signal lock at high latitudes during the 2015 St. Patrick's Day storm. J. Geophys. Res., 2018, V. 123, pp. 7943–7957.
9. Kintner P. M., Ledvina B. M., and De Paula E. R. GPS and ionospheric scintillations. Space Weather, 2007, V. 5, p. S09003.
10. McPherron R. L., Terasawa, and A. Nishida. Solar wind triggering of substorm expansion onset. J. Geomag. Geoelectr., 1986, V. 38, p. 1089.
11. Prikryl, P., Jayachandran, P. T., Mushini, S. C., Pokhotelov, D., MacDougall, J. W., Donovan, E., Spanswick, E., and St.-Maurice, J.-P. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum. Ann. Geophys., 2010, V. 28, pp. 1307–1316.
12. Van Dierendonck A. J., Klobuchar J., and Hua Q. Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers, Paper presented at Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1993), Salt Lake City, UT, September 22–24, 1993, pp. 1333–1342.

References

1. Belakhovsky V. B., Jin Y., Miloch W. Dnevnye stsintillyatsii GPS-signalov po dannym nablyudeniya na arhipelage Shpitsbergen [Dayside scintillations of GPS signals according to the observations on the Svalbard archipelago]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2022, vol. 86, no. 3, pp. 428–433 (In Russ.).
2. Basu S., Groves K. M., Basu S., and Sultan P. J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2022, vol. 64, pp. 1745–1754.
3. Belakhovsky V. B., Pilipenko V. A., Sakharov Y. A., Lorentzen D. L., and Samsonov S. N. Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. Earth Planets Space, 2017, vol. 69, pp. 105.
4. Belakhovsky V. B., Jin Y., Miloch W. J. Influence of different ionospheric disturbances on the GPS scintillations at high latitudes. Problems of Geocosmos – 2018. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2020, pp. 281–287.
5. Belakhovsky V. B., Jin Y., Miloch W. J. Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes. Ann. Geophys., 2021, vol. 39, pp. 687–700.
6. Carrano C. S., Anghel A., Quinn R. A., and Groves K. M. Kalman filter estimation of plasmaspheric total electron content using GPS. Radio Sci., 2009, vol. 44, p. RS0A10.
7. Jin Y., Zhou X., Moen J. I., Hairston M. The auroral ionosphere TEC response to an interplanetary shock. Geophys. Res. Lett., 2016, vol. 43, is. 5, pp. 1810–1818.
8. Jin Y. and Oksavik K. GPS scintillations and losses of signal lock at high latitudes during the 2015 St. Patrick's Day storm. J. Geophys. Res., 2018, vol. 123, pp. 7943–7957.
9. Kintner P. M., Ledvina B. M., and De Paula E. R. GPS and ionospheric scintillations. Space Weather, 2007, vol. 5, pp. S09003.
10. McPherron R. L., Terasawa, and A. Nishida. Solar wind triggering of substorm expansion onset. J. Geomag. Geoelectr., 1986, vol. 38, p. 1089.

11. Prikryl, P., Jayachandran, P. T., Mushini, S. C., Pokhotelov, D., MacDougall, J. W., Donovan, E., Spanswick, E., and St.-Maurice, J.-P. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum. *Ann. Geophys.*, 2010, vol. 28, pp. 1307–1316.
12. Van Dierendonck A. J., Klobuchar J., and Hua Q. Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers, Paper presented at Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1993), Salt Lake City, UT, September 22–24, 1993, pp. 1333–1342.

Информация об авторах

В. Б. Белаховский — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

Я. Джин — доктор философии, исследователь;

В. Милош — доктор философии, профессор.

Information about the authors

V. B. Belakhovsky — PhD (Physics and Mathematics), Senior scientific researcher;

Y. Jin — PhD, researcher;

W. Miloch — PhD, professor.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.