

УДК 551.510.535

ДНЕВНЫЕ СЦИНТИЛЛЯЦИИ GPS СИГНАЛОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН

© 2022 г. В. Б. Белаховский¹, *, Я. Джин², В. Милош²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Университет Осло, Осло, Норвегия

*E-mail: belakhov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Проведено сравнение уровня сцинтилляций GPS сигналов во время различных типов дневных ионосферных возмущений по данным GPS приемника на станции Нью-Алезунд (архипелаг Шпицберген), представлено два типичных случая. Показано, что дневные “патчи” полярной шапки приводят к более сильным возмущениям фазового индекса сцинтилляций, чем дневные высыпания заряженных частиц, высыпания в области каспа.

DOI: 10.31857/S0367676522030061

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) оказывают заметное влияние на жизнь современного общества. ГНСС приемники могут быть использованы не только как средство связи, навигации, но и как инструмент для исследования ионосферы. Наибольшее распространение для исследования ионосферы получили GPS приемники, которые работают на частотах $f_1 = 1575.42$ МГц и $f_2 = 1227.60$ МГц. Ионосфера оказывает существенное влияние на распространение радиоволн, сильные возмущения ионосферы способны сильно ухудшать качество принимаемого сигнала. Неоднородности в распределении ионосферной плазмы вследствие дифракции и рефракции электромагнитных волн при прохождении через плазму способны приводить к быстрым флуктуациям амплитуды и фазы сигнала. Для характеристики возмущенности ГНСС сигнала при прохождении через ионосферу введены амплитудный и фазовый индексы сцинтилляций [1, 2]. Мощные сцинтилляции порой могут приводить даже к потере GPS сигнала. Поэтому исследование ионосферных сцинтилляций является одним из наиболее важных направлений космической погоды. Амплитудные сцинтилляции вызваны неоднородностями ионосферной плазмы с размером от десятков до сотен метров, фазовые сцинтилляции вызваны неоднородностями размером от сотен метров до нескольких километров. Сцинтилляции ГНСС сигналов достигают наибольших значений в высокоширотных и экваториальных областях. Исследования показывают, что на высоких широтах наиболее вы-

ражены фазовые сцинтилляции, а амплитудные сцинтилляции наиболее выражены на экваториальных широтах.

Высокоширотные высыпания заряженных частиц приводят к формированию неоднородностей в распределении ионосферной плазмы и к появлению полярных сияний. Дискретные формы полярных сияний во время суббури приводят к росту фазовых сцинтилляций [3, 4]. Было показано, что распространяющиеся к полюсу авроральные формы (polar moving auroral forms – PMAF), появление которых вызвано пересоединением на магнитопаузе, приводят существенному росту фазовых сцинтилляций сигналов ГНСС [5]. В то же время дуги полярной шапки не оказывают существенного влияния на рост фазового индекса сцинтилляций [6].

К довольно существенным сцинтилляциям GPS сигналов могут приводить “патчи” полярной шапки (polar cap patches, PCP). PCP представляют собой возрастания более чем на порядок концентрации ионосферной плазмы на высотах выше 200 км. PCP формируются в результате проникновения плазмы солнечного ветра через область открытых силовых линий в ионосферу [7] во время магнитного пересоединения на дневной магнитопаузе. Также механизм образования PCP может быть связан с влиянием V_u -компоненты ММП на ионосферную конвекцию [8] или с образованием потоков ионосферной плазмы, переносимой УНЧ волнами [9]. PCP могут проявляться как распространяющиеся с полярных широт к более низким широтам формы полярных сияний в эмиссии 630.0 нм. В работах [10, 11] было показано, что

ночные РСР имеют более сильное влияние на фазовые сцинтилляции GPS сигналов, когда они происходят во время суббури.

Статистические исследования на основе многолетних наблюдений на архипелаге Шпицберген показали, что один из максимумов вероятности появления фазовых сцинтилляций находится вблизи полудня, второй максимум находится вблизи полуночи [12]. На ночной стороне фазовые сцинтилляции имеют более высокие значения, чем на дневной стороне. В то же время, на дневной стороне фазовые сцинтилляции появляются чаще, чем на ночной стороне.

В работах [13–15] на основе наблюдений на архипелаге Шпицберген было показано, что среди различных типов ионосферных возмущений суббури проводят к наибольшему росту фазового индекса сцинтилляций (1.5–3 радиана). Данное исследование является продолжением работ [13–15], в данной работе в отличие от вышеуказанных работ проведен анализ только дневных ионосферных возмущений.

В данной работе будет произведено сравнение степени воздействия дневных ионосферных возмущений, вызванных высыпаниями заряженных частиц, прохождением области каспа и РСР, на сцинтилляции GPS сигналов по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные сцинтилляционного GPS приемника (модель GSV4004B) на станции Нью-Алезунд (Ny-Ålesund – NYA), принадлежащего университету Осло (Норвегия). Данный приемник автоматически считает фазовый (σ_ϕ) и амплитудный (S_4) индексы сцинтилляций, полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы. Амплитуда и фаза несущей волны L_1 (1.57542 ГГц) записывается с частотой 50 Гц. Фазовый индекс сцинтилляций представляет собой стандартное отклонение фазы несущей волны, из которой вычтен низкочастотный тренд на частоте 0.1 Гц с использованием фильтра Баттлорда шестого порядка [15]. Амплитудный индекс сцинтилляций представляет собой стандартное отклонение мощности принимаемого сигнала на частоте 50 Гц, нормированное на среднее значение мощности в 1 мин окне. ROT (rate of TEC) представляет собой первую производную по времени от вариации ПЭС (TEC).

Использованы данные радара некогерентного рассеяния EISCAT 42m на архипелаге Шпицберген для определения концентрации ионосферной плазмы, температуры ионов, электронов, скорости плазмы. Луч радара EISCAT 42m направлен вдоль геомагнитного поля (азимут = 184°, наклонение = 82°).

Для идентификации области каспа использованы данные радара когерентного рассеяния SuperDARN в Ханкасалми (Финляндия). Подобная методика определения области каспа по спектру отраженного сигнала была использована в работах [16, 17].

Для регистрации интенсивности полярных сияний использованы данные камеры всего неба со станции NYA (557.7 нм, 630.0 нм), а также данные камер всего неба со станции Баренцбург Полярного геофизического института. Использованы данные магнитометра на станции Ny Ålesund (NYA; 78.92° с. ш., 11.95° в. д.). В скобках указаны географические координаты. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) определены из данных базы OMNI.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

За основу были взяты данные GPS приемника на станции Нью-Алезунд (арх. Шпицберген), рассматривались наблюдения за 2010–2017 гг. Рассматривались только те случаи, когда имелись одновременные наблюдения на радаре EISCAT 42m, использовавшимся для определения природы различных типов ионосферных возмущений, и на GPS приемнике. Наличие “патчей” полярной шапки определялось как резкое возрастание концентрации ионосферной плазмы выше 200 км. Высыпания заряженных частиц идентифицировались как рост концентрации ионосферной плазмы в диапазоне высот 100–200 км. В работе произведено сравнение воздействия дневных/касповых высыпаний и РСР на сцинтилляции GPS сигналов на примере двух типичных случаев.

Дневные/касповые высыпания

Рассмотрен случай 9 января 2016 г. Это был геомагнитно спокойный период ($SYM-H = -10$ нТл), скорость солнечного ветра имела средние значения ($V = 460$ км/с). Как видно из рис. 1, в интервалах времени 04–08 и 12–14 UT наблюдается увеличение ионосферной концентрации N_e в диапазоне высот 100–200 км, связанное с высыпанием заряженных частиц, по данным радара EISCAT 42m ($MLT = UT + 3$). При этом рост N_e наблюдался и выше 200 км. Увеличение интенсивности полярных сияний в эмиссии 557.7 нм по данным камеры всего неба NYA также свидетельствует о высыпании заряженных частиц (рис. 2, нижняя панель). По данным магнитометра на станции NYA (рис. 1.) в этот день не было зарегистрировано суббуревых возмущений.

Во время данных геомагнитных условий станция NYA часто оказывается в области каспа, области открытых силовых линий в околополуденном секторе. Касп занимает небольшую область: около 3 ч MLT по долготе и нескольких градусов

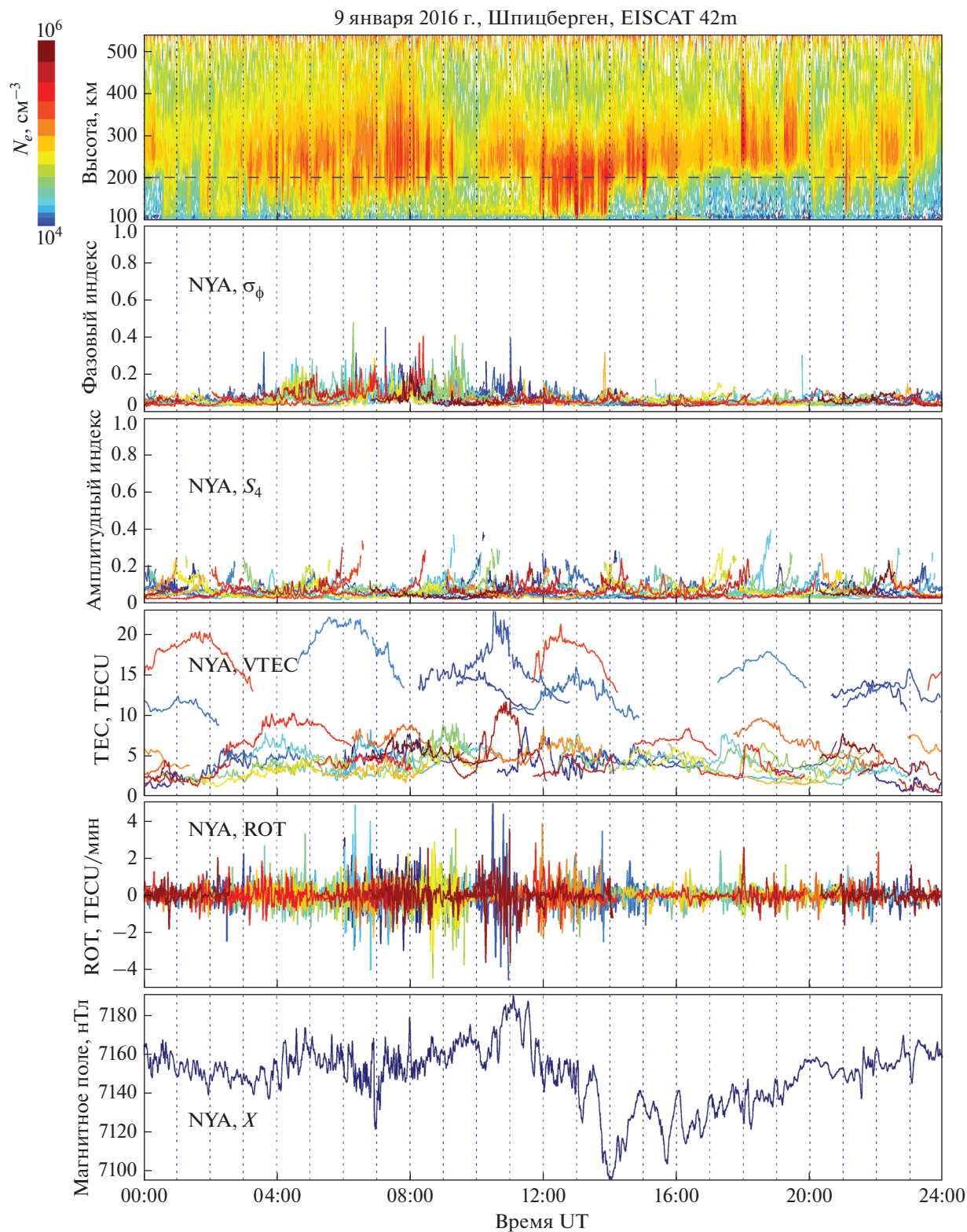


Рис. 1. Концентрация ионосферной плазмы в зависимости от высоты по данным радара EISCAT 42m; вариации фазового (σ_ϕ), амплитудного (S_4) индексов сцинтилляций, вариации вертикального ПЭС (VTEC) ионосферы, вариации ROT по данным ГНСС приемника на станции NYA; вариации X-компоненты геомагнитного поля на станции NYA для 9 января 2016 г.

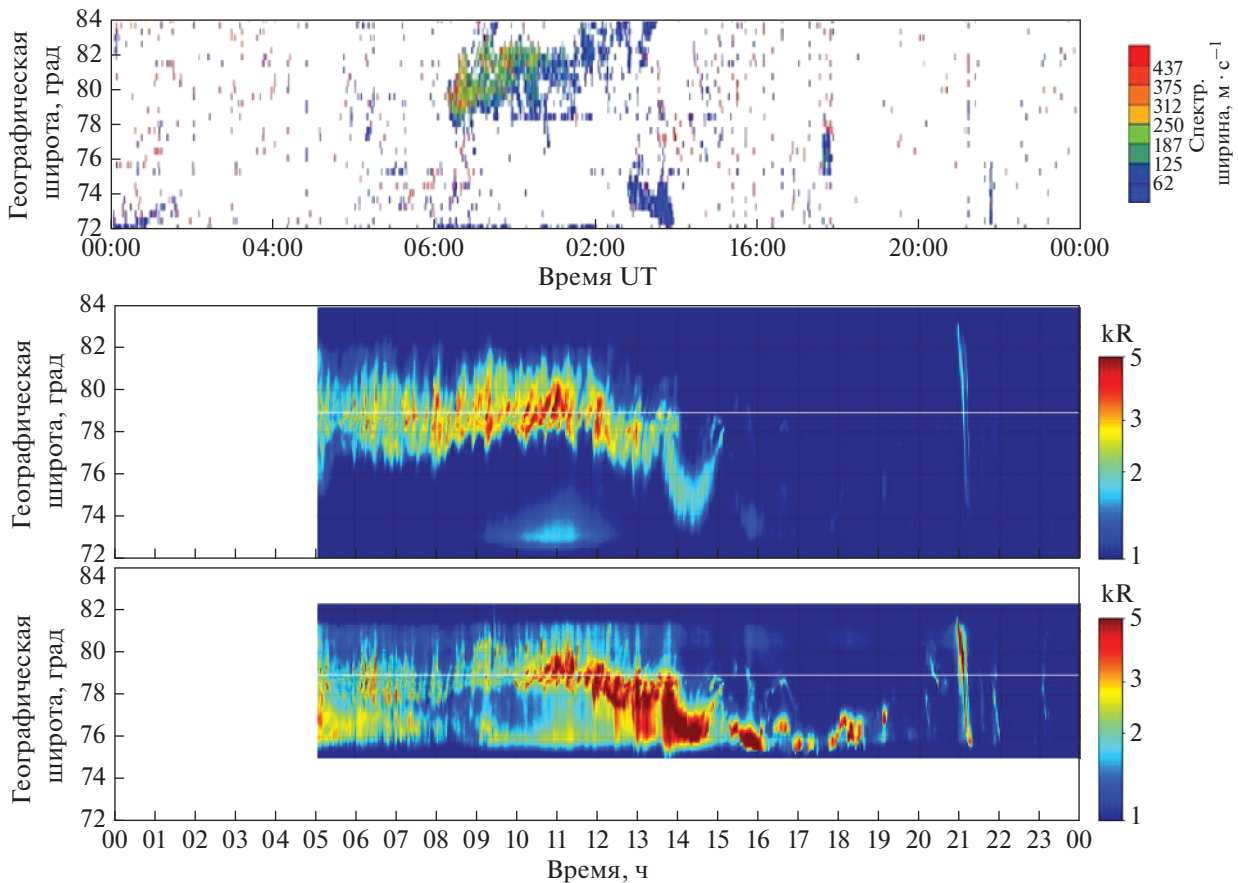


Рис. 2. Спектральная ширина отраженного от ионосферы сигнала в зависимости от географической широты по данным радара SuperDARN в Ханкасалми; кеограммы полярных сияний в эмиссиях 630.0 и 557.7 нм по данным камеры всего неба на станции NYA для 9 января 2016 г.

по широте. Область каспа может быть определена по спектру отраженного от ионосферы сигнала вследствие наличия повышенной турбулентности в этой области. По данным радара SuperDARN в Ханкасалми (луч 09) касп наблюдался в интервале примерно с 08 до 12 UT в виде увеличения спектральной ширины отраженного сигнала выше 200 м/с (рис. 2, верхняя панель). Экваториальная граница каспа располагалась на 78 градусах географической широты и выше. Рост интенсивности полярных сияний в эмиссии 630.0 нм при низкой интенсивности сияний в эмиссии 557.7 нм также может свидетельствовать о прохождении области каспа. По данным радара EISCAT 42m в интервале 08–11.30 UT не наблюдалось заметного роста N_e ниже 200 км, свидетельствующего о высыпании электронов с более жестким спектром, что также может свидетельствовать о прохождении области каспа.

Различные цвета на панелях 2–5 на рис. 1 представляют собой индексы сцинтилляций и ПЭС, определенные с помощью различных GPS спутников, которые находились в поле зрения GPS приемника. Во время дневных и касповых высыпаний заряженных частиц фазовый индекс сцин-

тилляций достигал значений порядка 0.4 радиан (рис. 1). По всей видимости, скачки в вариациях фазового индекса сцинтилляций в интервале 07–11 UT могут говорить о реакции GPS сигналов на прохождение области каспа. При этом во время достаточно мощных высыпаний с 12 до 14 UT не наблюдается заметного роста фазового индекса сцинтилляций, что может говорить о локализованном характере данных высыпаний. Амплитудный индекс сцинтилляций не имел явно выраженного отклика на дневные/касповые высыпания.

Во время прохождения области каспа наблюдается рост вертикального ПЭС (VTEC) до 12 TECU, рост ROT до 5 TECU/мин.

Дневные “патчи” полярной шапки

Влияние “патчей” полярной шапки, регистрируемых на дневной стороне, на сцинтилляции GPS сигналов рассмотрено на примере случая 7 ноября 2013 г. Это была небольшая геомагнитная буря ($SUM-H = -55$ нТл), вызванная CIR (corotating interaction region), скорость солнечного ветра достигала 390 км/с. Величина отрицательной бухты в X-компоненте геомагнитного поля на станции

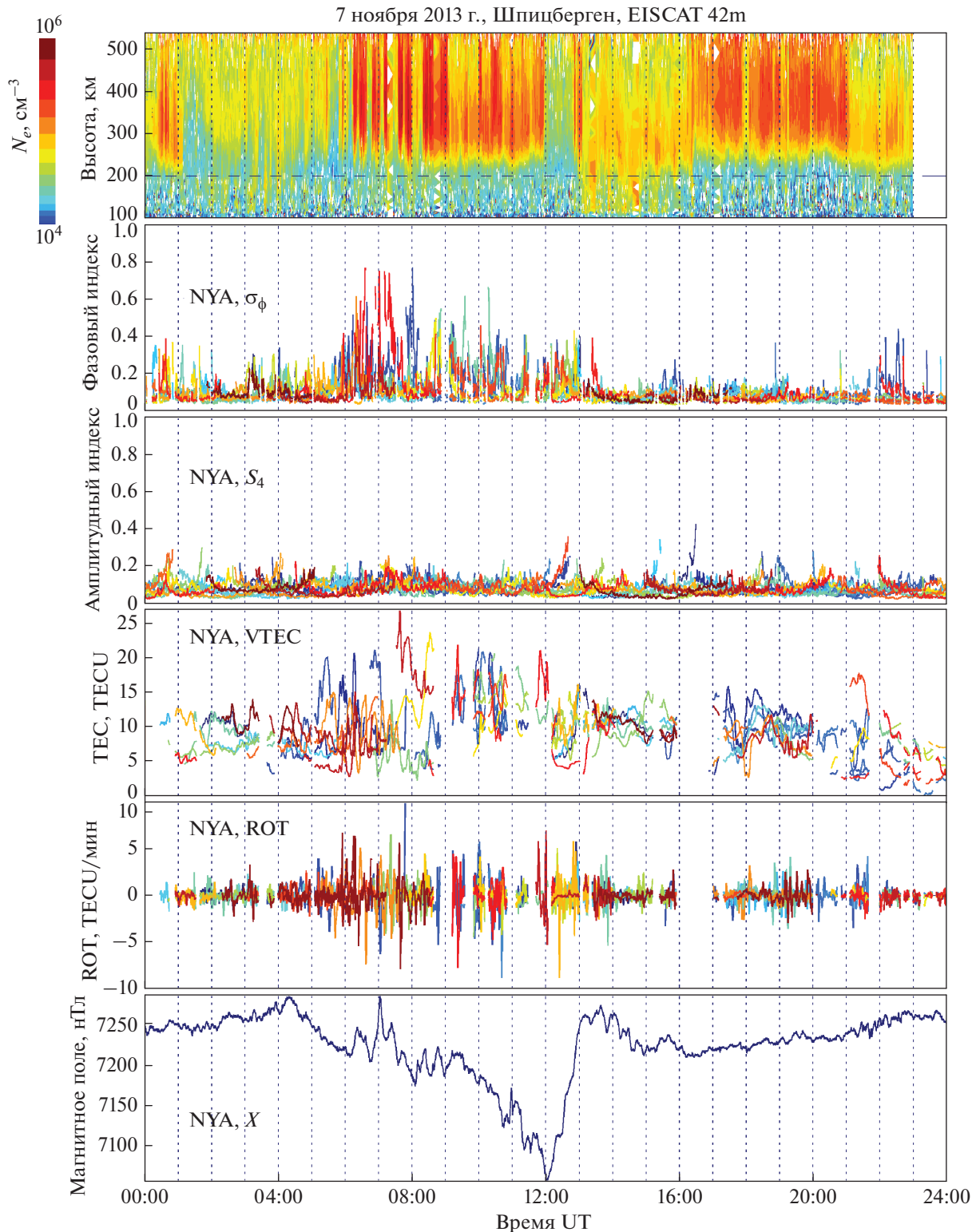


Рис. 3. Концентрация ионосферной плазмы в зависимости от высоты по данным радара EISCAT 42m; вариации фазового (σ_ϕ), амплитудного (S_4) индексов сцинтилляций, вариации вертикального ПЭС ионосферы (VTEC), вариации ROT по данным ГНСС приемника на станции NYA; вариации X-компоненты геомагнитного поля на станции NYA для 7 ноября 2013 г.

NYA достигала 200 нТл (рис. 3, нижняя панель). “Патчи” полярной шапки по данным радара EISCAT 42m были зарегистрированы в интервале

времени 06.00–12.00 UT (09–15 MLT) как резкое увеличение концентрации ионосферной плазмы выше 200 км (рис. 3, верхняя панель). Достаточно

мощные фазовые сцинтилляции (до 0.8 радиан) регистрировались в течение всего временного интервала, когда наблюдались РСР (рис. 3, вторая панель). Амплитудный индекс сцинтилляций не имел явно выраженного отклика на РСР. Во время появления РСРs наблюдался рост ПЭС ионосферы с 12 до 25 TECU. Вариации ROT имели достаточно высокие значения – порядка 7–10 TECU/мин.

В целом, как для РСР, так и для дневных высыпаний фазовый индекс сцинтилляций имел значения меньше 1 радиана. При этом для РСР вариации ROT достигали более высоких значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сопоставлены уровни фазовых сцинтилляций GPS сигналов во время различных типов дневных ионосферных возмущений по данным GPS приемника на станции Нью-Алезунд (архипелаг Шпицберген). Для идентификации ионосферных возмущений использованы данные радара неогерентного рассеяния EISCAT 42m, для идентификации каспа использованы данных радара SuperDARN в Ханкасалми (Финляндия). Показано, что дневные “патчи” полярной шапки приводят к более сильным возмущениям фазового индекса сцинтилляций (порядка 0.8 радиан), чем дневные и касповые высыпания заряженных частиц (0.4 радиан). Не обнаружено заметного отклика амплитудного индекса сцинтилляций на рассмотренные типы ионосферных возмущений. При этом РСР приводят к более высоким значениям ROT (до 10 TECU/мин), чем дневные и касповые высыпания. Представленные случаи характеризуют общую картину многолетних наблюдений за 2010–2017 гг. Приведенные исследования подтверждают важность “патчей” полярной шапки в формировании космической погоды в полярных широтах.

Авторы выражают благодарность проектам IMAGE (<http://www.ava.fmi.fi/image/>), EISCAT (<http://www.eiscat.se/madrigal>), SuperDARN (<http://vt.superdam.org/tiki-index.php>) за возможность использования данных.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-10018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2002. V. 64. No. 16. P. 1745.
2. Kintner P.M., Ledvina B.M., De Paula E.R. // Space Weather. 2007. V. 5. Art. No. S0900.
3. Smith A.M., Mitchell C.N., Watson R.J. et al. // Space Weather. 2008. V. 6. Art. No. s03d01.
4. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C. et al. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 1307.
5. Oksavik K., Van der Meeren C., Lorentzen D.A. et al. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 9161.
6. Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D.A. et al. // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 5723.
7. Lockwood M., Carlson Jr. H.C. // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 1731.
8. Milan S.E., Lester M., Yeoman T.K. // Ann. Geophys. 2002. V. 20. No. 4. P. 487.
9. Pitout F., Escoubet C., Lucek E. // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 2369.
10. Jin Y., Moen J., Miloch W. // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4. Art. No. A23.
11. Clausen L.B.N., Moen J.I., Hosokawa K., Holmes J.M. // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 3293.
12. Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 9176.
13. Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. Influence of different ionospheric disturbances on the GPS scintillations at high latitudes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2020. P. 281.
14. Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W. // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из косм. 2020. Т. 17. № 6. С. 139.
15. Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. // Тр. Кольск. НЦ РАН. Гелиогеофиз. 2017. Т. 8. № 7-3. С. 81.
16. Van Dierendonck A.J., Klobuchar J., Hua Q. // Proc. 6th Int. Tech. Meet. Satellite Divis. Inst. Navig. (Salt Lake City, 1993).
17. André R., Pinnock M., Rodger A.S. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. 12. Art. No. 27081.
18. Pilipenko V., Belakhovsky V., Engebretson M.J. et al. // Ann. Geophys. 2015. V. 33. P. 395.

The dayside scintillations of GPS signals according to the observations on Spitsbergen

V. B. Belakhovsky^{a, *}, Y. Jin^b, W. Miloch^b

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

^b Oslo University, Oslo, Norway

*e-mail: belakhov@mail.ru

A comparison of the level of GPS signals scintillations during various types of daytime ionospheric disturbances was made according to the data of the GPS receiver at the Ny Alesund station (Spitsbergen archipelago). It is shown that daytime polar cap patches lead to stronger disturbances of the phase scintillation index than daytime precipitations of charged particles, precipitates in the cusp region.