

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.025

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СЦИНТИЛЛЯЦИИ ГЛОНАСС/GPS СИГНАЛОВ В АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

В.Б. Белаховский¹, П.А. Будников², С.В. Пильгаев¹, В.А. Билин¹, А.В. Лосев¹

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская область, Россия

²Институт прикладной геофизики, Москва, Россия

Аннотация. Проведено сравнение влияния геомагнитных возмущений во время CME и CIR магнитных бурь на сцинтилляции сигналов ГНСС (ГЛОНАСС, GPS) по данным приемника Septentrio PolaRx5 в г. Апатиты (Мурманская область, Россия). Рассмотрены магнитные бури 3-4 ноября 2021 г. и 11-12 октября 2021 г. Анализ показывает, что значительный рост фазовых сцинтилляций происходит не только во время ночных и вечерних суббурь, но и во время дневных геомагнитных возмущений, сопровождающихся положительными бухтами в геомагнитном поле. Увеличение амплитудных сцинтилляций во время рассматриваемых событий для спутников ГЛОНАСС и GPS не обнаружено. Показано, что увеличение фазового индекса сцинтилляций не всегда пропорционально интенсивности геомагнитного возмущения. Иногда меньшие геомагнитные возмущения могут приводить к высоким фазовым сцинтилляциям. Установлено, что уровень фазовых сцинтилляций коррелирует с ростом амплитуды УНЧ волн (P₁₃/P₁₂ пульсации), наиболее сильные фазовые сцинтилляций совпадают с появлением УНЧ волн.

1. Введение

Высокоширотная и полярная ионосфера может оказывать негативное влияние на распространение радиоволн в различных частотных диапазонах. Спутниковая связь также подвержена ионосферным возмущениям. Неоднородности в распределении плотности ионосферной плазмы могут привести к быстрым флуктуациям амплитуды и фазы сигнала, известным как ионосферные сцинтилляции или мерцания [Basu et al., 2002]. Сильные сцинтилляции снижают качество сигнала и даже приводят к его потере. Уровень сцинтилляций характеризуется фазовым (σ_f) и амплитудным (S_4) индексами сцинтилляций. Амплитудные сцинтилляции вызываются плазменными неоднородностями с размерами от десятков до сотен метров, а фазовые — неоднородностями с размерами от сотен метров до нескольких километров. Ионосферные сцинтилляции наиболее выражены в экваториальной области и в высоких широтах [Basu et al., 2002; Kintner et al., 2007]. Фазовые сцинтилляции обычно вызываются вариациями показателя преломления из-за ионосферных неоднородностей масштаба от нескольких километров до нескольких десятков километров [Kintner et al., 2007].

Выделяют рекуррентные и нерекуррентные магнитные бури. Рекуррентные бури происходят каждые 27 дней, что соответствует периоду вращения Солнца. Нерекуррентные бури не имеют строгой периодичности в своем появлении. Корональные выбросы массы (CME) ответственны за нерекуррентные бури. Рекуррентные бури вызываются короткими областями взаимодействия (CIR – corotating interaction region), создаваемыми высокоскоростными потоками солнечного ветра, вытекающими из корональных дыр [Gonzalez et al., 1994]. Геомагнитная суббуря является наиболее мощным возмущением в высоких широтах. Магнитосферные суббури представляют собой последовательность процессов, происходящих после периода южного ММП и приводящих к высвобождению накопленной энергии из хвоста магнитосферы. Во время суббурь происходит разрыв конфигураций магнитосферных и ионосферных токовых систем, диполяризация в магнитном поле Земли, инжекция энергичных частиц на геостационарную орбиту, P₁₂-колебания в магнитном поле и т.д. [Kokobun et al., 1977].

Было обнаружено в работе [Hosokawa et al., 2014], что фазовые сцинтилляции усиливались к началу суббури и уменьшались по мере того, как полярные сияния становилось диффузными. Было предположено, что дискретное полярное сияние необходимо для возникновения мощных фазовых GPS сцинтилляций во время суббуревых интервалов. Помимо сцинтилляций наблюдались и другие эффекты во время появления сияний, такие как потеря сигнала [Prikryl et al., 2010]. В недавней работе [Belakhovsky et al., 2021] мы исследовали влияние полярных ионосферных возмущений на сцинтилляции GPS сигнала по наблюдениям на архипелаге Шпицберген. Было проведено сравнение влияния высыпаний в районе каспа, суббуревых высыпаний и «патчей» полярной шапки на сцинтилляции GPS сигнала. Архипелаг Шпицберген в разное время располагается в районе каспа, аврорального овала, полярной шапки.

В данной работе будет исследовано влияние ионосферных возмущений на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников для экваториальной части аврорального овала с использованием наблюдений на Кольском полуострове во время CME и CIR бурь.

2. Используемые данные

Использовались данные ГНСС приемника Septentrio PolaRx5 в г. Апатиты. Сцинтилляционный ГНСС приемник (модель GSV4004B) автоматически рассчитывает фазовый (σ_f) и амплитудный (S4) индексы сцинтилляций, полное электронное содержание (ПЭС, TEC - total electron content) ионосферы. Фазовый индекс сцинтилляций представляет собой стандартное отклонение фазы несущей волны, из которого с помощью фильтра Баттерворта шестого порядка вычитается низкочастотный тренд на частоте 0,1 Гц. Амплитудный индекс сцинтилляций представляет собой стандартное отклонение мощности принимаемого сигнала на частоте 50 Гц, нормированное на среднее значение мощности в 1-минутном окне. ROT (rate of TEC) – это первая производная по времени от изменения ПЭС. Оптические наблюдения полярных сияний в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм на станциях Ловозеро и Апатиты использовались также для регистрации различных ионосферных возмущений. Для регистрации геомагнитных возмущений использовались данные магнитометров ПГИ на станциях Ловозеро и Лопарская, данные сети IMAGE. Все станции расположены на Кольском полуострове и имеют следующие географические и геомагнитные координаты: Лопарская (LOP) – [68.63 с.ш., 33.25 в.д.], [64.94 с.ш., 113.6 в.д.], Ловозеро (LOZ) – [67.97 с.ш., 35.02 в.д.], [64.22 с.ш., 114.6 в.д.], Апатиты (APT) – [67.58 с.ш., 33.31 в.д.], [63.86 с.ш., 112.9 в.д.].

3. Анализ событий

В работе были рассмотрены данные ГНСС с приемника Septentrio в Апатитах за 2021 год. За рассматриваемый промежуток времени было зарегистрировано всего несколько магнитных бурь. В данной работе проведено сравнение уровня сцинтилляций сигналов российской системы ГЛОНАСС и американской системы GPS во время геомагнитных бурь 3-5 ноября 2021 г. и 11-12 октября 2021 г.

3.1. Событие 3-5 ноября 2021 г.

Это была геомагнитная буря, вызванная корональным выбросом массы (СМЕ). Приход межпланетной ударной волны был зарегистрирован в 22.00 UT как резкое увеличение скорости, плотности солнечного ветра, модуля межпланетного магнитного поля (ММП), индекса SYM-H (рис. 1). SYM-H индекс достигал значения около -120 нТл во время главной фазы геомагнитной бури. Это была наиболее сильная геомагнитная буря за последние 4 года. Скорость солнечного ветра превышала значение 800 км/с во время главной фазы бури. AE индекс достигает значения около 3000 нТл. Vz-компонента ММП достигает значений -18 нТл в момент начала бури, а затем в главную фазу бури.

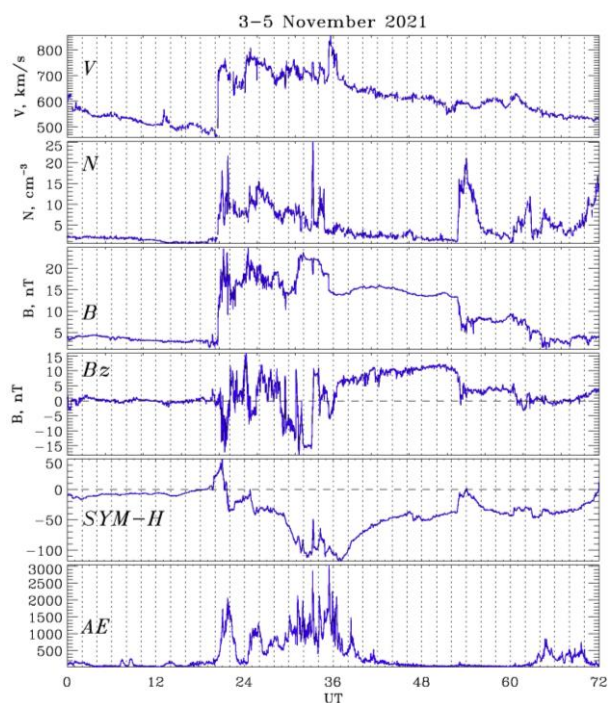


Рисунок 1. Скорость солнечного ветра V , плотность солнечного ветра N , модуль ММП B , B_z -компонента ММП по данным базы OMNI; SYM-H индекс, AE индекс 03-05.11.2021.

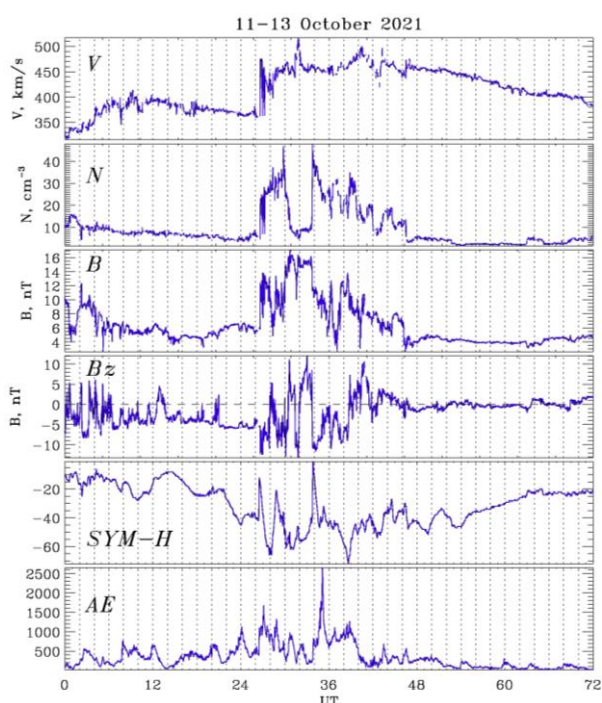


Рисунок 2. Скорость солнечного ветра V , плотность солнечного ветра N , модуль ММП B , B_z -компонента ММП по данным базы OMNI; SYM-H индекс, AE индекс 11-13.10.2021.

На рисунке 3 представлено сравнение влияния ионосферных возмущений на сигналы спутников GPS и ГЛОНАСС по данным приемника Septentrio в г. Апатиты для данной геомагнитной бури. Проведено сравнение ГНСС сцинтилляций с уровнем геомагнитных возмущений по измерениям на станции Ловозеро. Был также определен уровень Pi3/Pi2 пульсаций путем вычитания низкочастотного тренда из исходного сигнала (см. последние две панели на рис. 3). Геомагнитных пульсации могут вносить заметный вклад в создание высокого уровня ГНСС сцинтилляций, поскольку геомагнитные пульсации (УНЧ волны) вызывают высыпания заряженных частиц в ионосферу. Наибольшие значения фазового индекса сцинтилляций ($\sigma_{\phi} \approx 2$ радиан), определенные по спутникам GPS и ГЛОНАСС, наблюдались во время суббури после внезапного сжатия магнитосферы (событие SSC) в 21–22 UT 3 ноября 2021 г. Следующая суббуря в 00–03 UT приводит к более низкому уровню фазовых сцинтилляций (0,6–0,7 рад). Высокие значения фазового индекса сцинтилляций наблюдались не в течение всего интервала суббури, а во время взрывной фазы суббури. Ионосферные возмущения приводят к заметному увеличению фазового индекса сцинтилляций не только в ночном, но и в дневном секторе во время положительных бухт геомагнитного поля. Например, видно усиление фазовых сцинтилляций в 10–12 UT 4 ноября 2021 г. ($\sigma_{\phi} \approx 1$ радиан для GPS, $\sigma_{\phi} \approx 1,2$ рад для ГЛОНАСС).

Из рисунка 3 видна корреляция роста фазовых сцинтилляций с ростом амплитуды геомагнитных пульсаций. Амплитуда УНЧ волн достигает значения 150–250 нТл для X и Y компонент геомагнитного поля. Возмущений амплитудного индекса сцинтилляций, определяемого по данным спутников GPS и ГЛОНАСС, во время этих возмущений не наблюдается.

3.2. Событие 11–12 октября 2021 г.

Эта магнитная буря была вызвана высокоскоростным потоком солнечного ветра (CIR - corotating region взаимодействия). Это магнитная буря средней интенсивности (SYM-H ≈ -72 нТл). Скорость солнечного ветра превышала значение 500 км/с. AE-индекс достигал значения 2600 нТл (рис. 2).

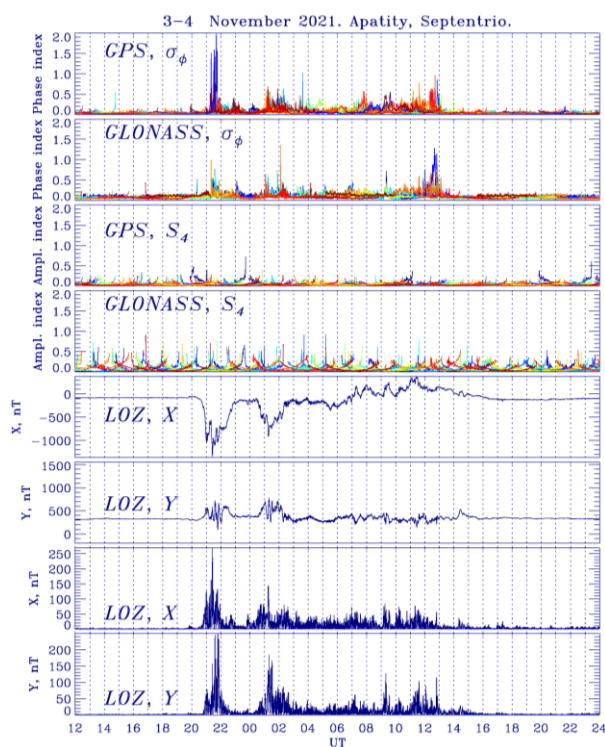


Рисунок 3. Фазовый (σ_{ϕ}) и амплитудный индексы сцинтилляций (S_4) по данным GPS и ГЛОНАСС спутников; вариации X и Y-компонент геомагнитного поля на ст. Ловозеро; амплитуда УНЧ волн в X и Y-компонентах на ст. Ловозеро 03-04.11.2021.

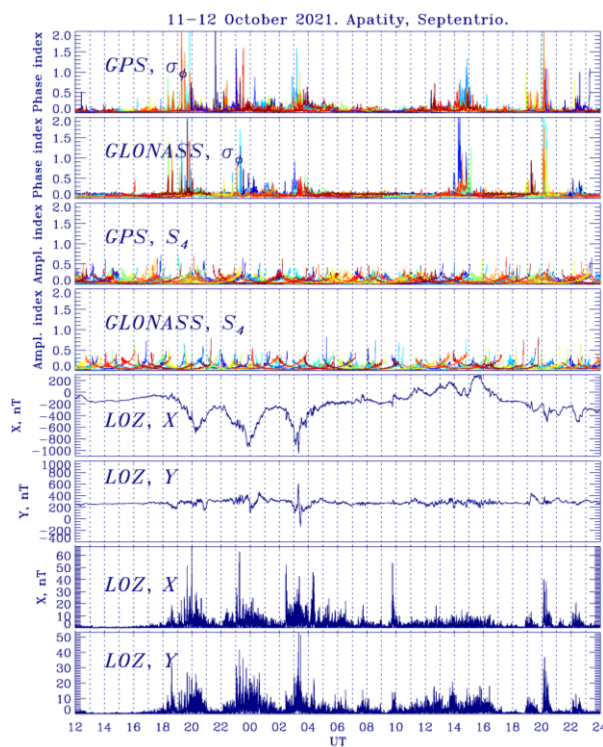


Рисунок 4. Фазовый (σ_{ϕ}) и амплитудный индексы сцинтилляций (S_4) по данным GPS и ГЛОНАСС спутников; вариации X и Y-компонент геомагнитного поля на ст. Ловозеро; амплитуда УНЧ волн в X и Y-компонентах на ст. Ловозеро 11-12.10.2021.

Во время этой магнитной бури SYM-H индекс испытывал заметные вариации, вызванные поворотом Vz-компоненты ММП к северу. На станции Ловозеро последовательно наблюдались 3 геомагнитные суббури:

около 20 UT, 00 UT, 03 UT. Амплитуда самой крупной суббури составила около 800 нТл в X-компоненте геомагнитного поля (рис. 4). Только третья суббуря сопровождалась сильным геомагнитным возмущением Y-компоненты. Все эти суббури вызывают сильные фазовые сцинтилляции как для GPS, так и для ГЛОНАСС спутников ($\sigma_{\phi} \approx 1,5-2$ рад). Для этого события также наблюдалось заметное увеличение индекса фазовых сцинтилляций не только в ночном, но и в дневном секторе 12 октября 2021 г., в 14-16 UT ($\sigma_{\phi} \approx 1,5-2$ рад для GPS, $\sigma_{\phi} \approx 2$ радиан для ГЛОНАСС). Увеличение фазового индекса сцинтилляций в дневном секторе обусловлено положительной бухтой в геомагнитном поле ($\Delta X = 200$ нТл). Анализ показывает, что увеличение σ_{ϕ} не коррелирует напрямую с амплитудой геомагнитного возмущения. Например, магнитная суббуря 11 октября в 20–21 UT с амплитудой около 600 нТл (X-компонента) привела к более заметному увеличению фазового индекса сцинтилляций ($\sigma_{\phi} \approx 2$ рад), чем суббуря 12 октября в 03–04 UT с амплитудой 800-900 нТл ($\sigma_{\phi} \approx 1,5$ рад). Таким образом, геомагнитное возмущение меньшей амплитуды может приводить к более высоким значениям фазового индекса сцинтилляций.

Рост фазовых сцинтилляций коррелирует с ростом амплитуды геомагнитных пульсаций. УНЧ волны могут приводить к высыпанию авроральных частиц, вызывающих неоднородности в распределении ионосферной плазмы. Амплитуда УНЧ волн достигает значения 50 нТл для X и Y компонент геомагнитного поля. Но некоторые скачки фазовых сцинтилляций не коррелируют с ростом амплитуды УНЧ волн. Таким образом, ионосферные возмущения, приводящие к сцинтилляциям ГНСС сигналов, могут быть вызваны и другими механизмами. Установлено, что наиболее сильные сцинтилляции совпадают по времени с ростом амплитуды УНЧ волн.

4. Выводы

В данной работе проведено сравнение влияния суббурь и дневных геомагнитных возмущений на сцинтилляции ГЛОНАСС/GPS сигналов во время двух типов магнитных бурь (СМЕ и CIR) с использованием приемника Septentrio PolaRx5 в Апатитах (Мурманская область, Россия). Анализ показывает, что заметное увеличение фазовых сцинтилляций ($\sigma_{\phi} \approx 2$) на спутниках ГЛОНАСС и GPS происходит не только во время ночных суббурь, но и во время дневных геомагнитных возмущений, связанных с положительными магнитными бухтами. Рост фазового индекса сцинтилляций не всегда пропорционален амплитуде геомагнитных возмущений. Геомагнитное возмущение меньшей амплитуды может привести к более высоким значениям фазового индекса сцинтилляций. Увеличение амплитудного индекса сцинтилляций для ГЛОНАСС/GPS сигналов во время рассматриваемых событий не обнаружено. Обнаружена корреляция уровня фазовых сцинтилляций с ростом амплитуды УНЧ волн (Pi3, Pi2 пульсации). Наиболее сильные фазовые сцинтилляции совпадают с появлением дуги полярных сияний (ориентированной с востока на запад и зарегистрированной камерой всего неба на станции Ловозеро) и с появлением УНЧ волн. Этот факт подтверждает важную роль УНЧ волн в генерации дуг полярных сияний.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018 (Белаховский В.Б.).

Литература

- Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // *Journal of Atmosph. Solar-Terr. Phys.*, 64 (16), 1745–1754, 2002.
- Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes // *Annales Geophysicae*, 39, 687–700, 2021.
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? // *Journal of Geophysical Research*, 99, A4, 5771-5792, 1994.
- Hosokawa K., Otsuka Y., Ogawa Y., Tsugawa T. Observations of GPS scintillation during an isolated auroral substorm // *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 16, 2014.
- Kintner P.M., Ledvina B.M., De Paula E.R. GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather*, 5, S0900, 2007.
- Kokubun S., McPherron R.L., Russell C.T. Triggering of substorms by solar wind discontinuities // *J. Geophys. Res.*, 82, 74–86, 1977.
- Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C. et al. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum // *Ann. Geophys.*, 28, 1307–1316, 2010.