

Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников по данным наблюдений на Кольском полуострове

В.Б. Белаховский¹, П.А. Будников², А.С. Калишин³, С.В. Пильгаев¹, А.В. Ролдугин¹

¹ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

² Институт прикладной геофизики, г. Москва

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: belakhov@mail.ru

Проведено сравнение влияния геомагнитных возмущений во время различных типов магнитных бурь (CME и CIR), во время изолированной суббури на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников с использованием приемника Septentrio PolaRx5, установленного в г. Апатиты (Мурманская область). Проанализированы данные наблюдений за 2021 год. Детально рассмотрены магнитные бури 3-4 ноября 2021 г. и 11-12 октября 2021 г. Анализ показывает, что наибольших значений фазовый индекс сцинтилляций достигает во время ночных и вечерних суббурь, сопровождающихся отрицательной бухтой в магнитном поле. Однако во время магнитных бурь положительные бухты в магнитном поле, связанные с усилением восточного электроджета, приводят к вполне сопоставимым значениям фазового индекса сцинтилляций. Уровень фазовых сцинтилляций во время ночных и вечерних возмущений коррелирует с ростом амплитуды УНЧ волн и с появлением дуг полярных сияний, что подтверждает вклад УНЧ волн в высыпание заряженных частиц в атмосферу. Преобладание зеленой линии в спектре полярных сияний говорит о вкладе возмущений в E-слое ионосферы в рост фазовых сцинтилляций. Анализ критических частот ионосферы по данным ионозонда на гидрометеорологической станции (ГМС) «Ловозеро» говорит о вкладе Es-слоя ионосферы в рост фазовых сцинтилляций. При этом пульсирующие полярные сияния приводят к заметному росту фазовых сцинтилляций. Разница в значении фазовых сцинтилляций на ГЛОНАСС и GPS спутниках в период отдельных возмущений может достигать примерно 1.5 раз как в одну, так и в другую сторону, что может быть связано с различными орбитами спутников. При этом уровень ГЛОНАСС/GPS сцинтилляций на частоте L2 несколько больше, чем на частоте L1. Увеличение амплитудного индекса сцинтилляций во время рассматриваемых событий не обнаружено.

Ключевые слова: ионосфера, GPS, ГЛОНАСС, магнитная буря, суббуря, полярные сияния

Influence of geomagnetic disturbances on GLONASS and GPS satellite signal scintillations based on observational data on the Kola Peninsula

V.B. Belakhovsky¹, P.A. Budnikov², A.S. Kalishin³, S.V. Pilgaev¹, A.V. Roldugin¹

¹ Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

² Institute of Applied Geophysics, Moscow

³ Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

The results of studies of the influence of the contact potential difference due to the structural features of field mills on the accuracy of estimates of the measurement of the gradient of the electric field are presented. A variant of the device design allowing to determine the value in the operating mode and to quickly compensate the contact potential difference is proposed. The effect of geomagnetic disturbances during various types of magnetic storms (CME and CIR) and during an isolated

substorm on the scintillations of GLONASS and GPS satellite signals was compared using a Septentrio PolaRx5 receiver installed in the city of Apatity (Murmansk region). The observational data for 2021 were analyzed. The magnetic storms of November 3–4, 2021 and October 11–12, 2021 are considered in detail. The analysis shows that the phase index of scintillations reaches the highest values during night and evening substorms accompanied by a negative bay in the magnetic field. However, during magnetic storms, positive bays in the magnetic field, associated with an increase in the eastern electrojet, lead to quite comparable values of the scintillation phase index. The level of phase scintillations during night and evening disturbances correlates with an increase in the amplitude of ULF waves and with the appearance of aurora arcs, which confirms the contribution of ULF waves to the precipitation of charged particles into the atmosphere. The predominance of the green line in the aurora spectrum indicates the contribution of disturbances in the ionospheric E-layer to the growth of phase scintillations. An analysis of the critical frequencies of the ionosphere according to the ionosonde data at the GMS Lovozero station indicates the contribution of the Es layer of the ionosphere to the growth of phase scintillations. In this case, pulsating auroras do not lead to a noticeable increase in phase scintillations. The difference in the value of phase scintillations on the GLONASS and GPS satellites during individual disturbances can reach approximately 1.5 times both in one direction and in the other, which may be due to different orbits of the satellites. At the same time, the level of GLONASS/GPS scintillations at the L2 frequency is slightly higher than at the L1 frequency. An increase in the amplitude index of scintillations during the considered events was not detected.

Keywords: ionosphere, GPS, GLONASS, magnetic storm, substorm, aurora

Введение

Возмущения в высокоширотной и полярной ионосфере оказывают негативное влияние на распространение радиоволн в различных частотных диапазонах. Трансионосферные сигналы дециметрового диапазона, используемые в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), также подвержены воздействию высокоширотных ионосферных возмущений. Неоднородности в распределении плотности ионосферной плазмы (порядка первой зоны Френеля, 100–300 м для ГНСС) могут привести к быстрым флуктуациям амплитуды и фазы сигнала ГНСС, известным как ионосферные сцинтилляции или мерцания [1]. Уровень сцинтилляций характеризуется фазовым (σ_ϕ) и амплитудным (S4) индексами сцинтилляций.

Для аврорального овала характерен высокий уровень турбулентности ионосферной плазмы. Например, наибольшее количество сбоев при определении ПЭС в периоды геомагнитных бурь наблюдается вблизи аврорального овала [2]. Было показано по данным наблюдений на архипелаге Шпицберген, что в районе полярной границы аврорального овала суббуревые возмущения приводят к наиболее высоким значениям фазового индекса сцинтилляций [3].

Представляет интерес сравнение уровня флуктуаций сигналов систем различных спутниковых систем, ГЛОНАСС и GPS, при развитии геомагнитных возмущений. Американская система GPS состоит из 32 спутников с высотой орбиты 20 200 км и наклоном орбиты 55°. Российская система ГЛОНАСС состоит из 24 спутников с высотой орбиты 19 100 км и наклоном орбиты 64.8°. Таким образом, ГЛОНАСС за счет наклона орбиты больше подходит для мониторинга высокоширотной ионосферы.

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 различных типов магнитных бурь (СМЕ и CIR) и во время изолированной суббури.

Используемые данные

В работе использовались данные ГНСС-приемника Septentrio PolaRx5, установленного на крыше здания Полярного геофизического института в г. Апатиты в конце 2020 года. Сам приемник ГНСС Septentrio PolaRx5 принадлежит Институту прикладной геофизики им. Е.К. Федорова (г. Москва). Сцинтилляционный ГНСС-приемник автоматически рассчитывает фазовый (σ_ϕ) и амплитудный (S4) индексы сцинтилляций, полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы для спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. Оптические наблюдения полярных сияний по данным камеры всего неба в обсерватории ПГИ «Ловозеро» использовались для идентификации ионосферных возмущений. Для регистрации геомагнитных возмущений использовались данные магнитометра ПГИ в обсерватории «Ловозеро» (LOZ). Использован ионозонд вертикального зондирования CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde), ГМС «Ловозеро». Зондирование проводится в диапазоне частот от 1 до 13 МГц, импульсная мощность излучения не превышает 600 Вт.

Анализ событий

В работе были рассмотрены данные ГНСС с приемника Septentrio в Апатитах за 2021 год. Детально проанализирована магнитная буря 3-5 ноября 2021 г., буря 11-12 октября 2021 г., изолированная суббуря. Магнитная буря 3-4 ноября 2021 г. была наиболее мощной за последние 4.5 года.

Представлены данные для магнитной бури 11-12 октября 2021 г., которая была вызвана взаимодействием высокоскоростного солнечного ветра из корональной дыры с более медленным солнечным ветром (CIR – corotating interaction region). Интенсивность магнитной бури была средней: SYM-H \approx -72 нТл. Скорость солнечного ветра превышала значение 500 км/с. AE-индекс достигал значения 2600 нТл. По данным магнитометра LOZ последовательно наблюдались 3 геомагнитные суббури: в 19–23 UT, 23–02, 02–05 UT (рис. 1.).

Наибольшей интенсивности была третья суббуря ($\Delta X \approx 800$ нТл), сопровождавшаяся сильным геомагнитным возмущением Y-компоненты ($\Delta Y \approx 700$ нТл). Все эти суббури вызывают сильные фазовые сцинтилляции как для спутников GPS, так и для спутников ГЛОНАСС ($\sigma_\phi \approx 1,5-2$ рад) – рис. 1. Наблюдалось заметное увеличение σ_ϕ не только в ночном, но и в дневном секторе в 14-16 UT 12 октября 2021 г. ($\sigma_\phi \approx 1,5-2$ рад для GPS, $\sigma_\phi \approx 2$ рад для ГЛОНАСС). Увеличение σ_ϕ в дневном секторе обусловлено положительной бухтой в магнитном поле ($\Delta X = 200$ нТл).

Анализ показывает, что увеличение σ_ϕ не всегда коррелирует с амплитудой геомагнитного возмущения. Например, магнитная суббуря в 20–21 UT 11 октября с амплитудой около 600 нТл (X-компонента) привела к более заметному увеличению фазового индекса сцинтилляций ($\sigma_\phi \approx 2$ рад), чем суббуря в 03–04 UT 12 октября с амплитудой 800-900 нТл ($\sigma_\phi \approx 1,5$ рад). Таким образом, геомагнитное возмущение меньшей амплитуды может приводить к более высоким значениям индекса фазы мерцаний.

Рост σ_ϕ хорошо коррелирует с ростом амплитуды УНЧ волн в вечернем и ночном секторах (рис. 1., две нижние панели). УНЧ волны могут приводить к высыпанию авроральных частиц, вызывающих неоднородности ионосферы. Амплитуда УНЧ волн достигает значения 50 нТл для X и Y-компонент. Но скачки σ_ϕ в дневном секторе (14-16 UT) не коррелируют с ростом амплитуды УНЧ волн. Скорее всего, это вызвано тем, что другие типы волновых возмущений (ОНЧ диапазона) участвуют в высыпании заряженных частиц и в развитии ионосферных неоднородностей.

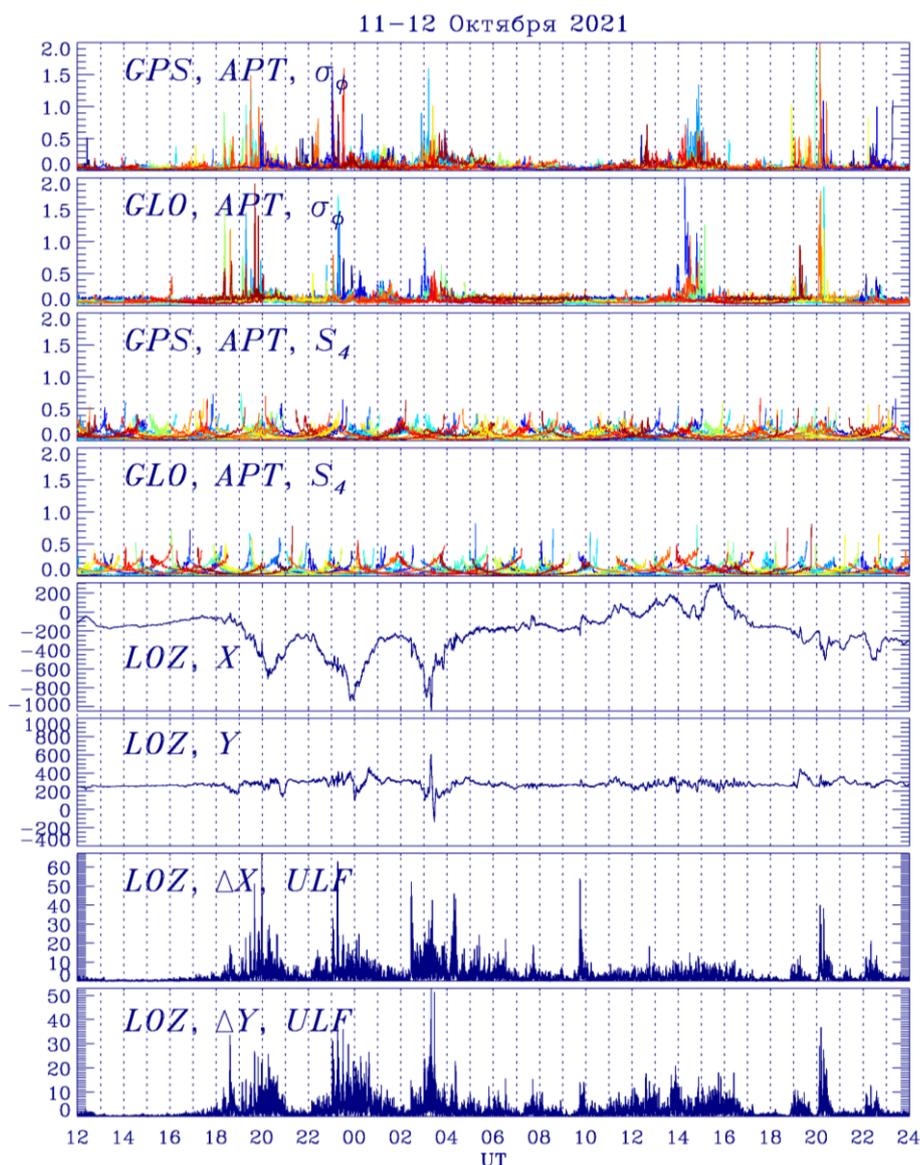


Рис. 1. Фазовый индекс сцинтилляций [рад], амплитудный индекс сцинтилляций по данным приемника на станции АРТ (Апатиты) для спутников GPS и ГЛОНАСС; вариации X, Y-компонент геомагнитного поля [нТл], вариации X, Y-компонент геомагнитного поля с убраным низкочастотным трендом (0.5 мГц) [нТл] по данным обсерватории «Ловозеро» для 11-12 октября 2021 года.

Наиболее мощные всплески σ_ϕ сопровождаются появлением дуг полярных сияний по данным камеры всего неба в обсерватории LOZ (Рис. 2.). Преобладание зеленой линии в спектре полярных сияний говорит о вкладе возмущений в E-слое ионосферы в рост σ_ϕ . Пульсирующие полярные сияния, для которых характерна диффузная форма, не сопровождаются ростом σ_ϕ (не показано). Считается, что пульсирующие сияния вызваны высыпанием электронов субрелятивистских (релятивистских) энергий. Поэтому возмущения в D-слое ионосферы не приводят к росту ГЛОНАСС/GPS сцинтилляций.

Анализ ионограмм вертикального зондирования на станции Ловозеро (Рис. 3.) в период развития наиболее мощных фазовых сцинтилляций говорит о формировании Es слоя. На ионограммах наблюдаются интенсивные боковые отражения от неоднородностей на высоте Es- области, Es-слой имеет хорошо выраженный плоский нижний край с расслоениями и рассеянными отражениями над ним. Подобная

структура ионограмм, наблюдается в период магнитных возмущений, сопровождаемых полярными сияниями. Анализ данных ионозонда в п. Ловозера показывает коррелированный с σ_{Φ} рост критической частоты и предельно отражаемых частот слоя Es (рис. 3) в период двух первых суббурь в 19–23 UT и 23–02 UT. Во время наиболее сильного возмущения с 02 до 05 UT 12 октября наблюдалось полное поглощение зондирующих сигналов, и следы отражений на ионограммах отсутствовали. Примеры регистрируемых ионограмм во время флуктуаций σ_{Φ} в вечернем секторе приведены на рис. 3.

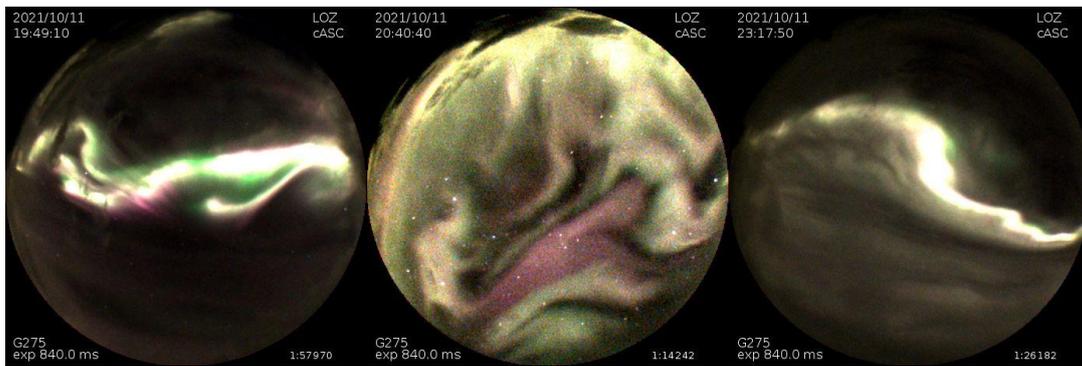


Рис. 2. Кадры камеры всего неба в обсерватории «Ловозеро» для моментов времени 19.49 UT, 23.17 UT 11 октября 2021 года.

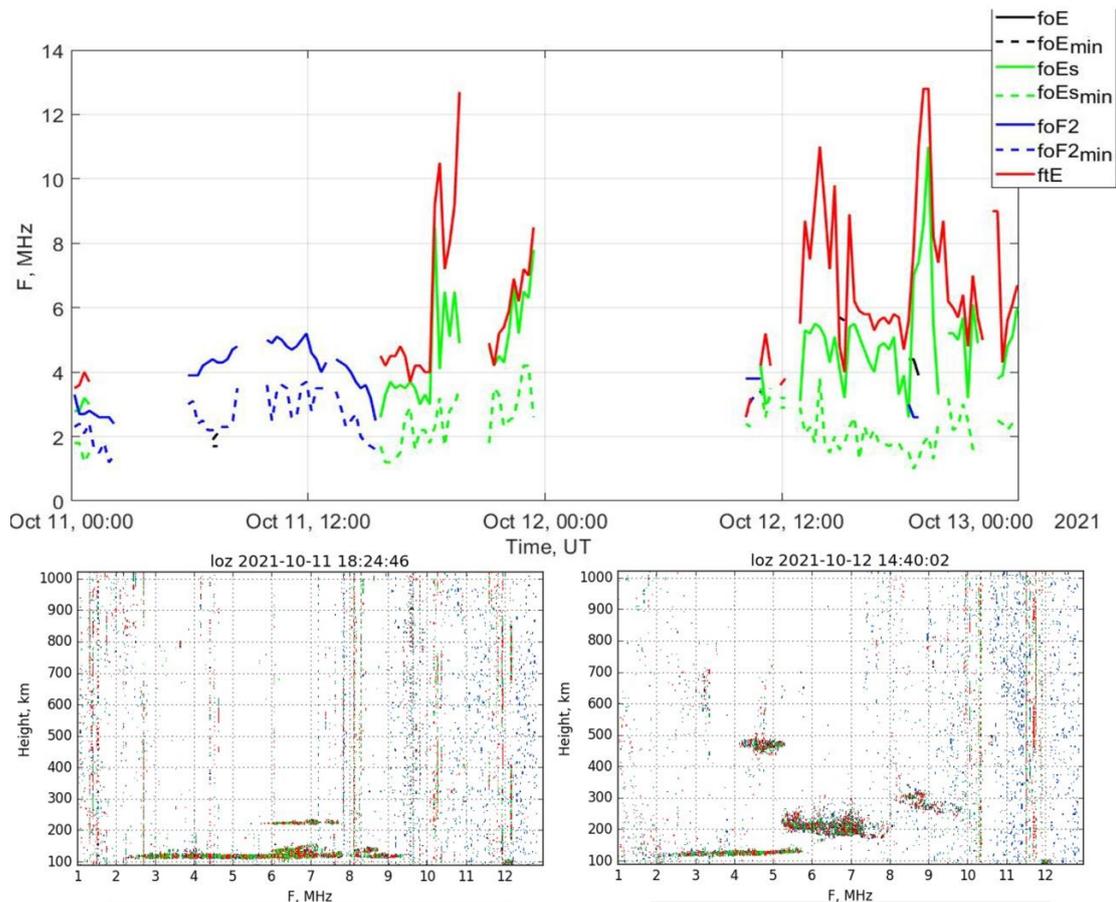


Рис. 3. Суточный ход критических частот ионосферы 11-12 октября 2021 года, ионограммы по данным ионозонда на станции ГМС «Ловозеро» (18.24 UT 11.10.2021, 14.40 UT 12.10.2021).

Наблюдается различие в уровне σ_f по данным ГЛОНАСС и GPS спутников, что, по всей видимости, связано с различными орбитами спутников и прохождением сигналов через локальные ионосферные возмущения по разным траекториям. При этом величина σ_f на частоте L2 (не показано) несколько больше, чем на частоте L1. Увеличение амплитудных сцинтилляций (S4) GPS/ГЛОНАСС во время рассматриваемых событий не обнаружено.

Заключение

В данной работе проведена оценка влияния геомагнитных, авроральных возмущений на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников во время изолированной суббури, во время СМЕ и CIR магнитных бурь с использованием приемника Septentrio PolaRx5 в Апатитах (Мурманская область, Россия). Анализ показывает, что заметное увеличение фазовых мерцаний ($\sigma_f \approx 2$) на спутниках GPS и ГЛОНАСС происходит не только во время ночных и вечерних суббурь, но и во время дневных геомагнитных возмущений, связанных с положительными магнитными бурями. Во время CIR магнитной бури, несмотря на ее гораздо меньшую интенсивность, уровень σ_f больше, чем во время СМЕ бури.

Наблюдается различие в уровне σ_f по данным ГЛОНАСС и GPS спутников, что, по всей видимости, связано с различными орбитами спутников и прохождением сигналов через локальные ионосферные возмущения по разным траекториям.

Обнаружена корреляция уровня фазовых сцинтилляций с ростом амплитуды УНЧ волн (P_{i3}, P_{i2}) в ночном (вечернем) секторе и с появлением дуг полярных сияний. Это подтверждает важную роль УНЧ волн в формировании авроральной дуги и в развитие ионосферных неоднородностей. Преобладание зеленой линии в спектре полярных сияний говорит о вкладе возмущений в E-слое ионосферы в рост сцинтилляций.

Анализ критических частот ионосферы по данным ионозонда вертикального зондирования на станции УГМС «Ловозеро» говорит о вкладе Es-слоя в рост σ_f во время наиболее сильных геомагнитных возмущений.

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

Литература

1. 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. 2002. 64 (16). P. 1745–1754.
2. Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, superstorms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. 2014. Vol. 12. Iss. 7. P. 508-525.
3. Belakhovsky V.B., Jin Y., and Miloch W.J. Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes // Annales Geophysicae. 2021. 39. P. 687–700.