

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СЦИНТИЛЛЯЦИИ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС И GPS ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

INFLUENCE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES ON SCINTILLATIONS OF GLONASS AND GPS SIGNALS AS OBSERVED ON THE KOLA PENINSULA

В.Б. Белаховский 

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

П.А. Будников

Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова,
Москва, Россия, pavel9860@gmail.com

А.С. Калишин 

Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru

С.В. Пильгаев

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, pilgaev@pgia.ru

А.В. Ролдугин

Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, roldugin_a@pgia.ru

V.B. Belakhovsky

Polar geophysical institute,
Apatity, Russia, belakhov@mail.ru

P.A. Budnikov

Fedorov Institute of Applied Geophysics,
Moscow, Russia, pavel9860@gmail.com

A.S. Kalishin

Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
askalishin@aari.ru

S.V. Pilgaev

Polar geophysical institute,
Apatity, Russia, pilgaev@pgia.ru

A.V. Roldugin

Polar geophysical institute,
Apatity, Russia, roldugin_a@pgia.ru

Аннотация. Проведено сравнение влияния геомагнитных возмущений во время магнитных бурь различных типов (СМЕ и CIR) и во время изолированной суббури на сцинтилляции сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS с использованием приемника Septentrio PolaRx5, установленного в г. Апатиты (Мурманская область, Россия). Проанализированы данные наблюдений за 2021 г. Детально рассмотрены магнитные бури 3–4 ноября 2021 г. и 11–12 октября 2021 г. Магнитная буря 3–4 ноября 2021 г. была одной из наиболее мощных за последние годы. Анализ показывает, что наибольших значений фазовый индекс сцинтилляций достигает во время ночных и вечерних суббурь ($\sigma_{\Phi} \approx 1.5\text{--}1.8$), 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 σ_{Φ} .

Рост фазовых сцинтилляций во время ночных и вечерних возмущений коррелирует с ростом интенсивности УНЧ-волн (Pi3/Pc5 пульсации) и появлением дуг полярных сияний. Это подтверждает важную роль УНЧ-волн в формировании авроральной дуги и развитии ионосферных неоднородностей. Преобладание зеленой линии в спектре полярных сияний говорит о вкладе возмущений в E-слое ионосферы в рост фазовых сцинтилляций. Пульсирующие полярные сияния, связанные с ионосферными возмущениями в D-слое, не сопровождаются заметным ростом фазовых сцинтилляций. Анализ критических частот ионосферы по данным ионозонда

Abstract. We have compared effects of geomagnetic disturbances during magnetic storms of various types (CME and CIR) and during an isolated substorm on scintillations of GLONASS and GPS signals, using a Septentrio PolaRx5 receiver installed in Apatity (Murmansk Region, Russia). We analyze observational data for 2021. The magnetic storms of November 3–4, 2021 and October 11–12, 2021 are examined in detail. The November 3–4, 2021 magnetic storm was one of the most powerful in recent years. The analysis shows that the scintillation phase index reaches its highest values during nighttime and evening substorms ($\sigma_{\Phi} \approx 1.5\text{--}1.8$), accompanied by a negative bay in the magnetic field. During magnetic storms, positive bays in the magnetic field, associated with an increase in the eastward electrojet, lead, however, to quite comparable values of the phase scintillation index.

An increase in phase scintillations during nighttime and evening disturbances correlates with an increase in the intensity of ULF waves (Pi3/Pc5 pulsations) and with the appearance of aurora arcs. This confirms the important role of ULF waves in forming the auroral arc and in developing ionospheric irregularities. The predominance of the green line in the spectrum of auroras indicates the contribution of disturbances in the ionospheric E layer to the scintillation increase. Pulsating auroras, associated with ionospheric disturbances in the D layer, do not lead to a noticeable increase in phase scintillations. Analysis of ionospheric critical frequencies according to ionosonde data from the Lovzero Hydrometeorological Station indicates the contribution of the sporadic E_s layer of the ionosphere to jumps in phase scintillations.

на гидрометеорологической станции «Ловозеро» говорит о формировании спорадического E_s-слоя ионосферы во время роста фазовых сцинтилляций.

Разница в значении фазовых сцинтилляций на спутниках ГЛОНАСС и GPS в период отдельных возмущений может достигать 1.5 раз, что может быть связано с различными орбитами спутников. При этом уровень ГЛОНАСС/GPS-сцинтилляций на частоте L2 выше, чем на частоте L1. Увеличения амплитудного индекса сцинтилляций во время рассматриваемых событий не обнаружено.

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

The difference between phase scintillation values on GLONASS and GPS satellites during individual disturbances can be as great as 1.5 times, 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 higher than at the L1 frequency. We did not find an increase in the amplitude index of scintillations during the events considered.

Keywords: ionosphere, GLONASS, GPS, 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 (с размерами порядка первой зоны Френеля, 100–300 м для ГНСС) ионосферной плазмы могут привести к быстрым флуктуациям амплитуды и фазы сигнала ГНСС, известным как ионосферные сцинтилляции или мерцания [Yeh, Liu, 1982; Basu et al., 2002]. Сильные сцинтилляции снижают качество сигнала и даже приводят к его потере. Уровень сцинтилляций характеризуется фазовым (σ_f) и амплитудным (S4) индексами сцинтилляций. Амплитудные сцинтилляции вызываются плазменными неоднородностями с размерами от десятков до сотен метров, а фазовые — неоднородностями размерами от сотен метров до нескольких километров. Ионосферные сцинтилляции наиболее выражены в экваториальной области и на высоких широтах [Basu et al., 2002, Kintner et al., 2007].

В качестве характеристики возмущенности ГНСС-сигнала используется также скорость изменения полного электронного содержания (ПЭС, TEC) ионосферы ROT (Rate of TEC). Интенсивность флуктуаций оценивалась с использованием карт ROTI (индекс ROT) для высокоширотного региона [Cherniak et al., 2014]. Вариации ПЭС (ROT) в целом хорошо связаны с вариациями σ_f [Makarevich et al., 2021], но во время отдельных событий эта связь может быть не так очевидна [Belakhovsky et al., 2021].

Представляет интерес сравнение уровня флуктуаций сигналов различных спутниковых систем, а именно, ГЛОНАСС и GPS, при развитии геомагнитных возмущений. Американская система GPS состоит из 32 спутников с высотой орбиты 20200 км и наклоном орбиты 55°. Используются частоты L1=1575.42 МГц, L2=1227.60 МГц. Российская система ГЛОНАСС состоит из 24 спутников с высотой орбиты 19100 км и наклоном орбиты 64.8°. Используются частоты L1=1602 МГц, L2=1246 МГц. Таким образом, ГЛОНАСС за счет большего накло-

нения орбиты лучше подходит для мониторинга высокоширотной ионосферы, чем GPS. Показано [Ясюкевич и др., 2017], что плотность сбоев измерения псевдодальности P1 на высоких широтах для системы ГЛОНАСС ниже, чем для GPS. На средних широтах, напротив, стабильность измерения псевдодальности на основной частоте для GPS выше, чем для ГЛОНАСС. В работах [Захаров и др., 2016, 2020; Chernyshov et al., 2020] было показано, что вероятность фазового сбоя по частоте L2 даже в спокойных условиях приема больше от 3 до 15 раз, чем по фазе L1. Аналогичное соотношение справедливо для вероятностей сбоя по псевдодальностям P2 и P1. При этом вероятность сбоев по фазе L2 больше, чем по фазе L1, до ~10 раз для магнитных бурь и суббурь класса G3. С ростом силы бури это соотношение уменьшается до 5–7 раз.

Для аврорального овала характерен высокий уровень турбулентности ионосферной плазмы. Например, наибольшее количество сбоев при определении ПЭС в периоды геомагнитных бурь наблюдается вблизи аврорального овала [Astafyeva et al., 2014]. Было показано, что динамика аврорального овала (модель NORUSKA) и динамика пространственно-временного распределения флуктуаций TEC, обусловленных ионосферными неоднородностями в области овала, подобны [Черноус и др., 2018]. Имеется хорошее соответствие в положениях аврорального овала и овала неоднородностей. Имеющееся расхождение может быть обусловлено тем, что авроральный овал проецируется на высоту 110 км, а овал неоднородностей — на высоту 450 км, при этом не учитывается искривление магнитных силовых линий. Обнаружено [Черноус и др., 2015], что лучистые дуги полярных сияний являются индикаторами нарушений в работе навигационных систем. В работе [Шагимуратов и др., 2021] было показано, что флуктуации TEC, вызванные появлением полярных сияний, приводят к ошибкам позиционирования более 20 м при прохождении сигнала через дугу полярных сияний. В работе [Козелов и др., 2019] было высказано предположение, что помехи в GPS-навигации войск НАТО в период проведения учений «Единый трезубец» (Trident Juncture) в октябре–ноябре 2018 г. могли быть связаны с возмущениями космической погоды и развитием авроральных возмущений в ионосфере.

Выделяют рекуррентные и нерекуррентные магнитные бури. Первые связаны с появлением корональных дыр на поверхности Солнца. Они происходят каждые 27 дней, что соответствует периоду вращения Солнца. Рекуррентные бури вызываются короткими областями взаимодействия (CIR — corotating interaction region), создаваемыми высокоскоростными потоками солнечного ветра (СВ), вытекающими из корональных дыр [Gonzalez et al., 1994]. Рекуррентные магнитные бури часто называют CIR-бурями. Нерекуррентные бури не имеют строгой периодичности в своем появлении, за них ответственны корональные выбросы массы (СМЕ, coronal mass ejection), поэтому их называют СМЕ-бурями. В отличие от CIR-бурь, СМЕ-бури сопровождаются появлением SSC-импульса (storm sudden commencement), связанного с приходом межпланетной ударной волны (МУВ). В статье [Borovsky, Denton, 2006] выделено 21 отличие между СМЕ и CIR магнитными бурями.

Геомагнитная суббура является наиболее мощным возмущением в высоких широтах. Магнитосферные суббури представляют собой последовательность процессов, происходящих после периода южного межпланетного магнитного поля (ММП) и приводящих к высвобождению накопленной энергии из хвоста магнитосферы. Во время суббурь происходит разрыв конфигураций магнитосферной и полярной ионосферной токовых систем, диполяризация в магнитном поле Земли, инжекция энергичных частиц на геостационарную орбиту, Pi2-колебания в магнитном поле и т. д. [Kokubun et al., 1977]. Было сделано предположение [Smith et al., 2008], что для возникновения мощных фазовых GPS-сцинтилляций во время суббуревых интервалов необходимо дискретное полярное сияние. Помимо сцинтилляций наблюдались и другие эффекты во время появления сияний, такие как потеря сигнала [Prikryl et al., 2010].

В серии недавних работ [Belakhovsky et al., 2020, 2021; Белаховский и др., 2022] мы исследовали влияние полярных ионосферных возмущений на сцинтилляции GPS-сигналов по наблюдениям на архипелаге Шпицберген с использованием данных радара EISCAT 42m. Было проведено сравнение влияния высыпаний в районе каспа, утренних высыпаний, суббуревых высыпаний, патчей полярной шапки, высыпаний во время прихода МУВ на сцинтилляции GPS-сигналов. Было показано, что среди ионосферных возмущений рассмотренных типов суббуревые возмущения приводят к наиболее высоким значениям σ_f . Архипелаг Шпицберген в разное время находится у полярной границы аврорального овала, в районе каспа, в области полярной шапки. В данной работе использованы ГНСС-наблюдения на Кольском полуострове, который в среднем располагается в более экваториальной части аврорального овала.

В данной работе будет исследовано влияние ионосферных возмущений на сцинтилляции сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS для авроральной области с использованием наблюдений на Кольском полуострове во время магнитных бурь различных типов (СМЕ и CIR) и во время изолированной суббури.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использовались данные ГНСС-приемника Septentrio PolaRx5, установленного в конце 2020 г. на крыше здания Полярного геофизического института (Апатиты). Географические и геомагнитные координаты г. Апатиты (АРТ) — 67.58° N , 33.31° E и 63.86° N , 112.9° E . Сам приемник ГНСС Septentrio PolaRx5 принадлежит Институту прикладной геофизики им. Е.К. Федорова (Москва). В работе были проанализированы результаты наблюдений за 2021 г.

Сцинтилляционный ГНСС-приемник автоматически рассчитывает фазовый σ_f и амплитудный S4 индексы сцинтилляций, а также ПЭС ионосферы для спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. Фазовый индекс 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 — стандартное отклонение мощности принимаемого сигнала на частоте 50 Гц, нормированное на среднее значение мощности в 1-минутном окне; ROT (скорость изменения ПЭС) — первая производная по времени от ПЭС.

Оптические наблюдения полярных сияний по данным камеры всего неба в обсерватории ПГИ «Ловозеро» использовались также для идентификации ионосферных возмущений. Для регистрации геомагнитных возмущений использовались данные магнитометра ПГИ в обсерватории «Ловозеро» (LOZ), имеющей следующие географические и геомагнитные координаты — 67.97° N , 35.02° E и 64.22° N , 114.6° E . Для анализа использовались также карты эквивалентных ионосферных токовых систем, построенные по данным сети магнитометров IMAGE.

Использовался ионозонд вертикального зондирования CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) [Gao, MacDougall, 1991], установленный на гидрометеорологической станции (ГМС) «Ловозеро». Зондирование проводится в диапазоне частот 1–13 МГц, импульсная мощность излучения не превышает 600 Вт. Зондирующий сигнал представляет собой 13-битовую кодовую последовательность Баркера с четырехкратным повторением. Антенная система комплекса состоит из двух широкополосных дельта-полотен, расположенных ортогонально. Одна дельтаобразная антенна является передающей, другая — приемной.

Для определения параметров СВ и ММП использовались данные базы OMNI, для оценки уровня геомагнитной активности — индексы SYM-H, AE.

2. АНАЛИЗ СОБЫТИЙ

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

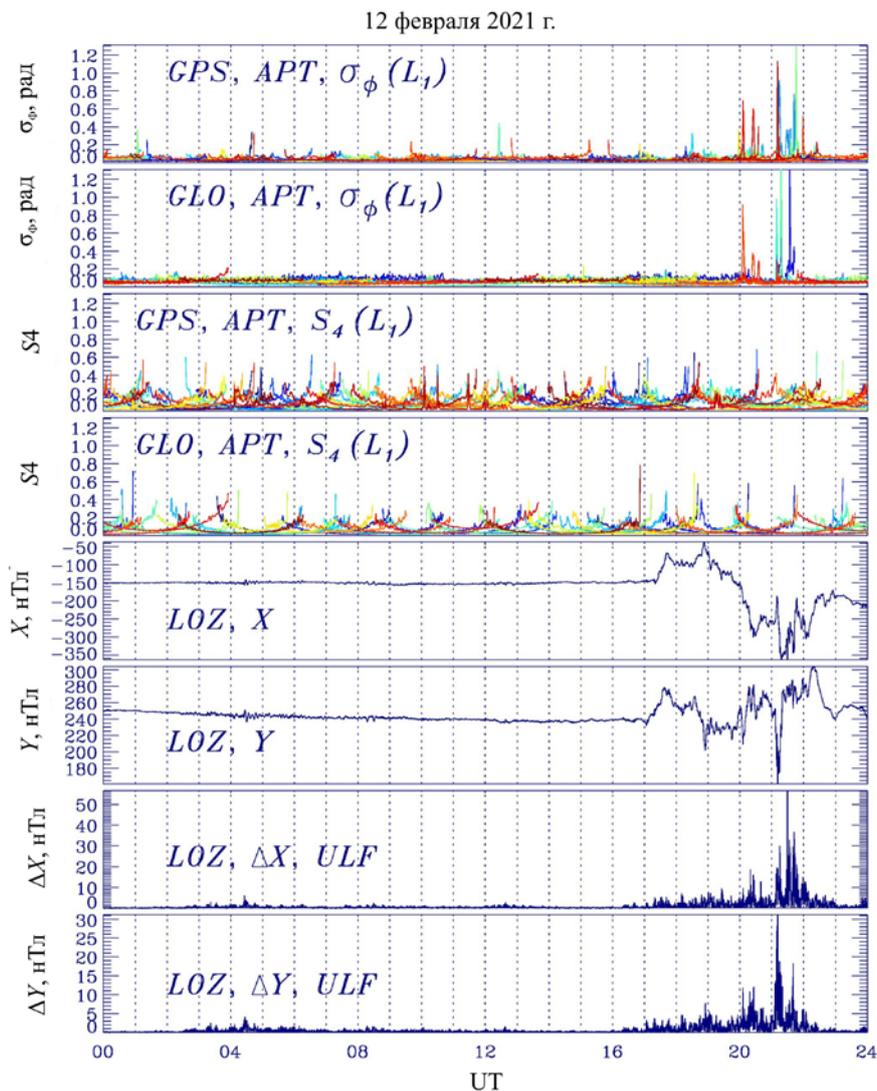


Рис. 1. Фазовый индекс скинтилляций, амплитудный индекс скинтилляций (на частоте L_1) по данным приемника на станции АРТ (Апатиты) для спутников GPS и ГЛОНАСС; вариации X, Y-компонент геомагнитного поля по данным обсерватории «Ловозеро», вариации X, Y-компонент геомагнитного поля с убраным низкочастотным трендом (0.5 мГц) по данным обсерватории «Ловозеро» для 12.02.2021

2.1. Изолированная суббурия

В качестве примера рассматривалась суббурия 12 февраля 2021 г. Это были спокойные геомагнитные условия: $SUM-H$ -индекс в этот день достигал 10 нТл, AE составлял около 500 нТл. За четыре дня до этого также не было зафиксировано возмущений в $SUM-H$ (Dst) индексе. Скорость СВ составляла $V \sim 350$ км/с. Поворот B_z -компоненты ММП к югу в 16 UT (на рисунках не показан) привел к развитию суббурии.

Было проведено сопоставление вариаций геомагнитного поля по данным магнитометра в обсерватории ПГИ «Ловозеро» с индексами σ_ϕ и S_4 , определяемыми по данным спутников GPS и ГЛОНАСС (рис. 1). Разными цветами показаны фазовый и амплитудный индексы скинтилляций для различных GPS и ГЛОНАСС спутников, пролетающих в поле зрения ГНСС-приемника Septentrio (Апатиты).

Наибольших значений 1.2–1.3 рад σ_ϕ достигает в 20–22 UT во время суббурии (отрицательной маг-

нитной бухты), связанной с развитием западного электроджета (см. рис. 1). При этом вариации σ_ϕ по данным спутников GPS и ГЛОНАСС в целом достаточно схожи. Отклика в S_4 во время рассматриваемых возмущений не наблюдается.

Для определения вклада УНЧ (ультранизкочастотных) волновых геомагнитных возмущений (Pc5/P13 диапазона) в рост скинтилляций из исходных геомагнитных данных был вычтен низкочастотный тренд 0.5 мГц (см. рис. 1, две нижние панели). Видно, что всплески УНЧ волновой геомагнитной активности в целом совпадают с ростом σ_ϕ . Это может говорить о вкладе УНЧ-волн в высыпание заряженных частиц (электронов, протонов) в высокоширотную ионосферу. Высыпание заряженных частиц приводит к появлению ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов, что и приводит к появлению скинтилляций (или мерцаний) сигналов ГНСС.

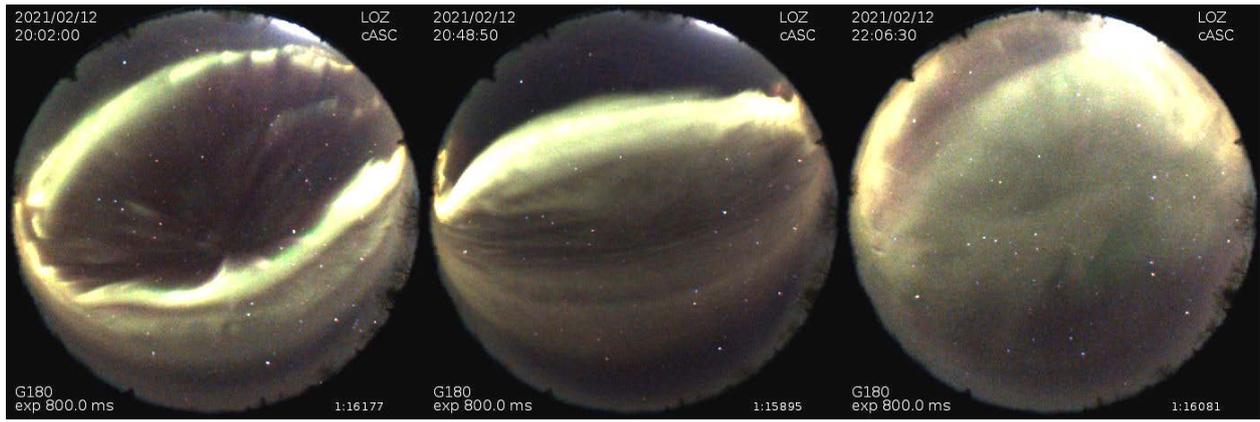


Рис. 2. Кадры камеры всего неба в обсерватории «Ловозеро» для моментов времени 20:02 UT, 20:48 UT, 21:09 UT 12.02.2021

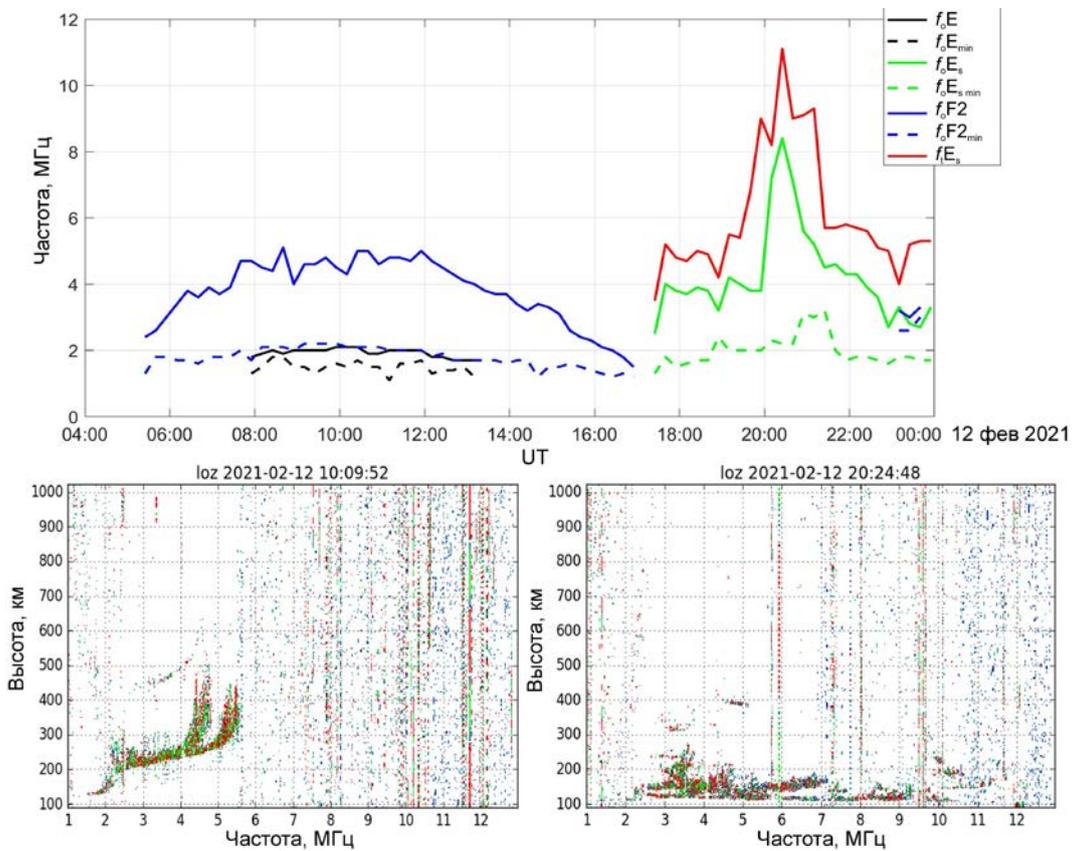


Рис. 3. Суточный ход критических частот ионосферы, ионограммы по данным ионозонда на станции ГМС «Ловозеро» 12.02.2021, 10:09 UT, 20:24 UT

Наибольший рост σ_p сопровождался появлением ярких дуг полярных сияний по данным камеры всего неба в обсерватории «Ловозеро» (рис. 2) в зеленой линии (557.7 нм). Известно, что зеленые полярные сияния наблюдаются на высотах порядка 100–120 км. Поэтому можно полагать, что рост фазовых сцинтилляций вызван ионосферными возмущениями в E-области.

На рис. 3 показан суточный ход критических частот ионосферы по данным ионозонда на станции УГМС «Ловозеро» (верхняя панель), ионограммы (две нижние панели). Здесь f_oE_s — критическая частота E_s-слоя ионосферы; $f_oE_{s\min}$ — минимальная критическая частота E_s-слоя; f_oE — критическая частота E-слоя ионосферы; f_oE_{\min} — минимальная кри-

тическая частота E-слоя; f_oF2 — критическая частота F2-слоя; f_oF2_{\min} — минимальная критическая частота F2-слоя; f_oE_s — предельно отражаемая частота от E_s. Анализ критических частот показывает, что период 00–17 UT 12 февраля 2021 г. характеризуется спокойными условиями. Отчетливо виден суточный ход критических частот F2- и E-слоев, минимально наблюдаемые частоты находятся в области 1.3–1.7 МГц, что говорит об отсутствии поглощения в нижних слоях ионосферы. С 17 UT регистрируются незначительные ионосферные возмущения в виде спорадического слоя E_s, критическое значение частоты f_oE_s находится в пределах 3.2–4 МГц. Незначительно возрастает ионосферное поглощение — минимально наблюдаемые частоты находятся в области 2 МГц.

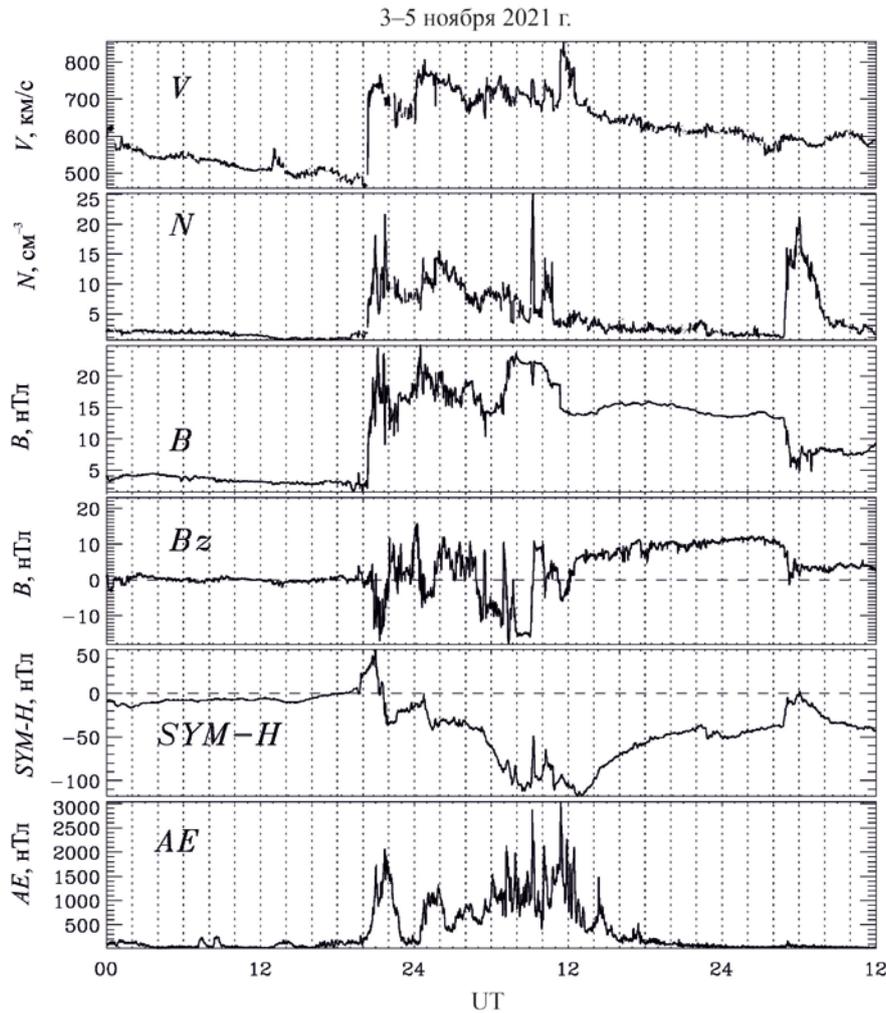


Рис. 4. Вариации скорости солнечного ветра V , плотности солнечного ветра N , модуля ММП B , B_z -компоненты ММП, $SYM-H$, AE 3–5 ноября 2021 г.

В 19:40 UT наблюдается резкое увеличение f_oE_s , также возрастает fE_s — предельно отражаемая от E_s частота. На ионограммах область E_s имеет хорошо выраженный плоский нижний край с расслоениями и рассеянными отражениями над ним. Следы отражений от E_s -слоя имеют действующую высоту в области 110–200 км. Подобная структура ионограмм, как правило, наблюдается в период магнитных возмущений, сопровождаемых полярными сияниями. С 20:10 до 21:35 UT f_oE_s достигает максимума и возвращается к значениям до момента взрывного возрастания в 22:25 UT.

Сравнение σ_Φ на частотах $L1$ (см. рис. 1) и $L2$ (рис. 11, верхняя панель) показывает, что на $L2$ σ_Φ принимает более высокие значения, чем на $L1$ (см. рис. 11). Так, в 20–22 UT σ_Φ достигает значений ~ 1.5 – 1.6 рад на $L2$ и ~ 1.2 – 1.3 рад на $L1$.

2.2. СМЕ магнитная буря

Рассмотрена магнитная буря 3–5 ноября 2021 г., вызванная приходом СМЕ к Земле. До недавнего времени это была наиболее сильная геомагнитная буря за последние 4.5 года, поэтому рассмотрение

данного события имеет дополнительный интерес. Приход МУВ был зарегистрирован в 22:00 UT как резкое увеличение скорости, плотности СВ, модуля ММП, индекса $SYM-H$ (рис. 4). Интенсивность магнитной бури во время главной фазы геомагнитной бури была выше средней: $SYM-H \sim -120$ нТл, $V \geq 800$ км/с, $AE \sim 3000$ нТл. Во время бури B_z -компонента ММП несколько раз меняла свой знак на отрицательный (до -18 нТл), что приводило к проникновению плазмы СВ внутрь магнитосферы Земли.

По данным станции LOZ наиболее сильная суббуря во время данной бури наблюдалась 3 ноября в 20–23 UT, ее амплитуда в X-компоненте составила ~ 1300 нТл (рис. 5). Вариации геомагнитного поля в Y-компоненте во время данной суббури составили ~ 500 нТл (см. рис. 5), что говорит о преобладании аврорального электроджета над вихревыми возмущениями [Белаховский и др., 2023]. Последовавшая 4 ноября в 00–03 UT суббуря имела меньшую интенсивность (700 нТл).

На рис. 5 показано сравнение влияния геомагнитных возмущений на сигналы спутников GPS и ГЛОНАСС по данным приемника Septentrio (Апа-

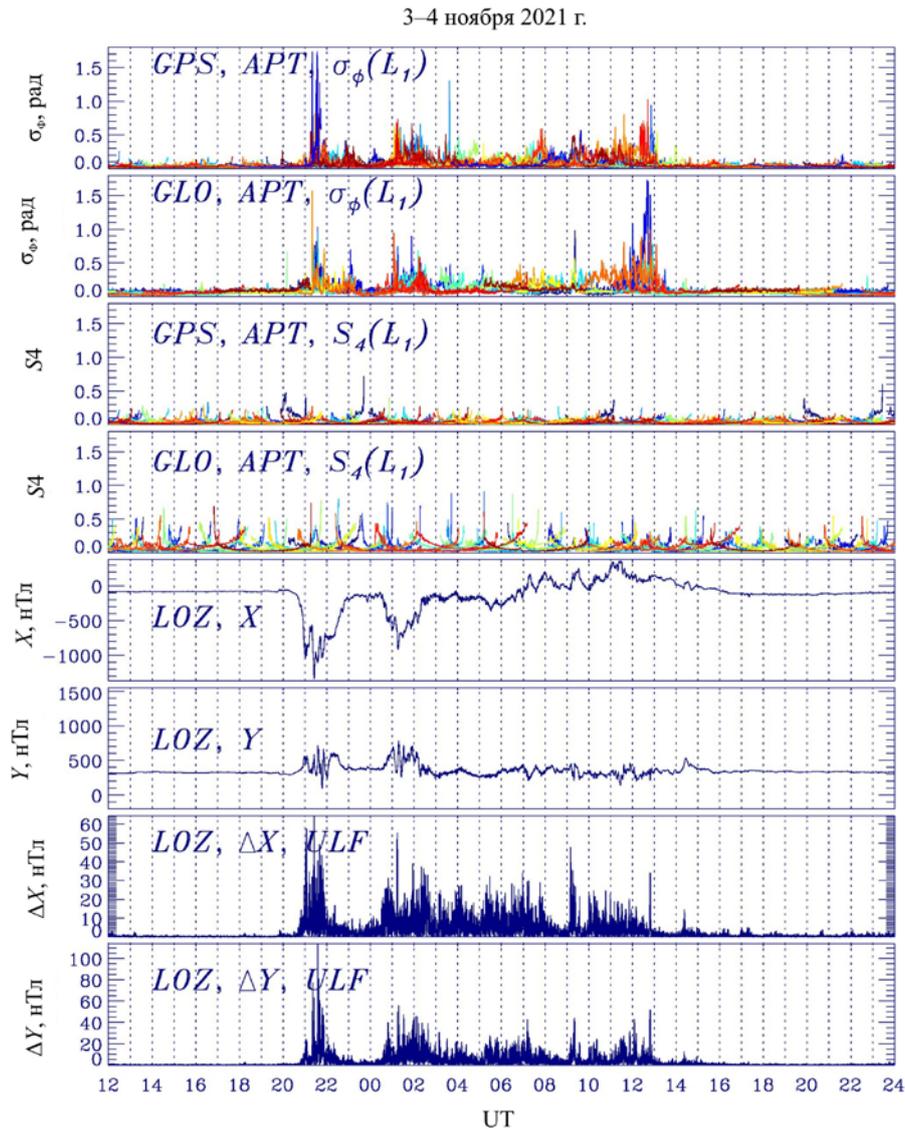


Рис. 5. Фазовый индекс скинтилляций, амплитудный индекс скинтилляций (на частоте L_1) по данным приемника на станции АРТ (Апатиты) для спутников GPS и ГЛОНАСС; вариации X , Y -компонент геомагнитного поля по данным обсерватории «Ловозеро»; вариации X , Y -компонент геомагнитного поля с убраным низкочастотным трендом (0.5 мГц) по данным обсерватории «Ловозеро» 3–4 ноября 2021 г.

титы). Проведено сравнение ГНСС-скинтилляций с вариациями геомагнитного поля, регистрируемыми в обсерватории «Ловозеро». Заметного роста σ_ϕ во время непосредственно SSC-события ($\sigma_\phi \sim 0.1\text{--}0.2$ рад) не наблюдалось. Наибольшие значения фазового индекса скинтилляций ($\sigma_\phi \sim 1.8$ рад), определенные по спутникам GPS и ГЛОНАСС, наблюдались во время суббури, последовавшей после внезапного сжатия магнитосферы (событие SSC) в 21–22 UT 3 ноября 2021 г. Следующая суббуря в 00–03 UT привела к более низкому уровню фазовых скинтилляций (0.6–0.7 рад). Высокие значения σ_ϕ наблюдались в течение не всего интервала суббури, а только ее взрывной фазы. Ионосферные возмущения привели к заметному увеличению σ_ϕ не только в ночном секторе, но и в дневном во время положительных бухт геомагнитного поля. Например, видно усиление фазовых скинтилляций в 12–14 UT 4 ноября 2021 г. ($\sigma_\phi \sim 1$ рад для GPS, $\sigma_\phi \sim 1.3$ рад для ГЛОНАСС).

Сравнение значений σ_ϕ для спутников ГЛОНАСС и GPS показывает, что разница может достигать почти 1.5 раз. Например, во время суббури в 21–22 UT 3 ноября 2021 г. по данным ГЛОНАСС $\sigma_\phi \sim 1.2$ рад, а по данным GPS $\sigma_\phi \sim 1.8$ рад. Во время суббури в 11–13 UT 4 ноября 2021 г. по данным ГЛОНАСС $\sigma_\phi \sim 1.4$ рад, а по данным GPS — 1 рад.

Был определен также уровень УНЧ-колебаний (P3-P5 пульсаций) путем вычитания низкочастотного тренда из исходного сигнала (см. последние две панели на рис. 5). УНЧ-волны могут вносить вклад в имеющийся высокий уровень ГНСС-скинтилляций, поскольку они участвуют в высыпании заряженных частиц в ионосферу, которые и приводят к развитию ионосферных неоднородностей. Видна хорошая связь роста σ_ϕ с ростом амплитуды УНЧ-колебаний для ночных возмущений в 20–23, 00–04 UT. Амплитуда УНЧ-волн достигает значения 120 нТл для Y -компоненты и 60 нТл для X -компоненты.

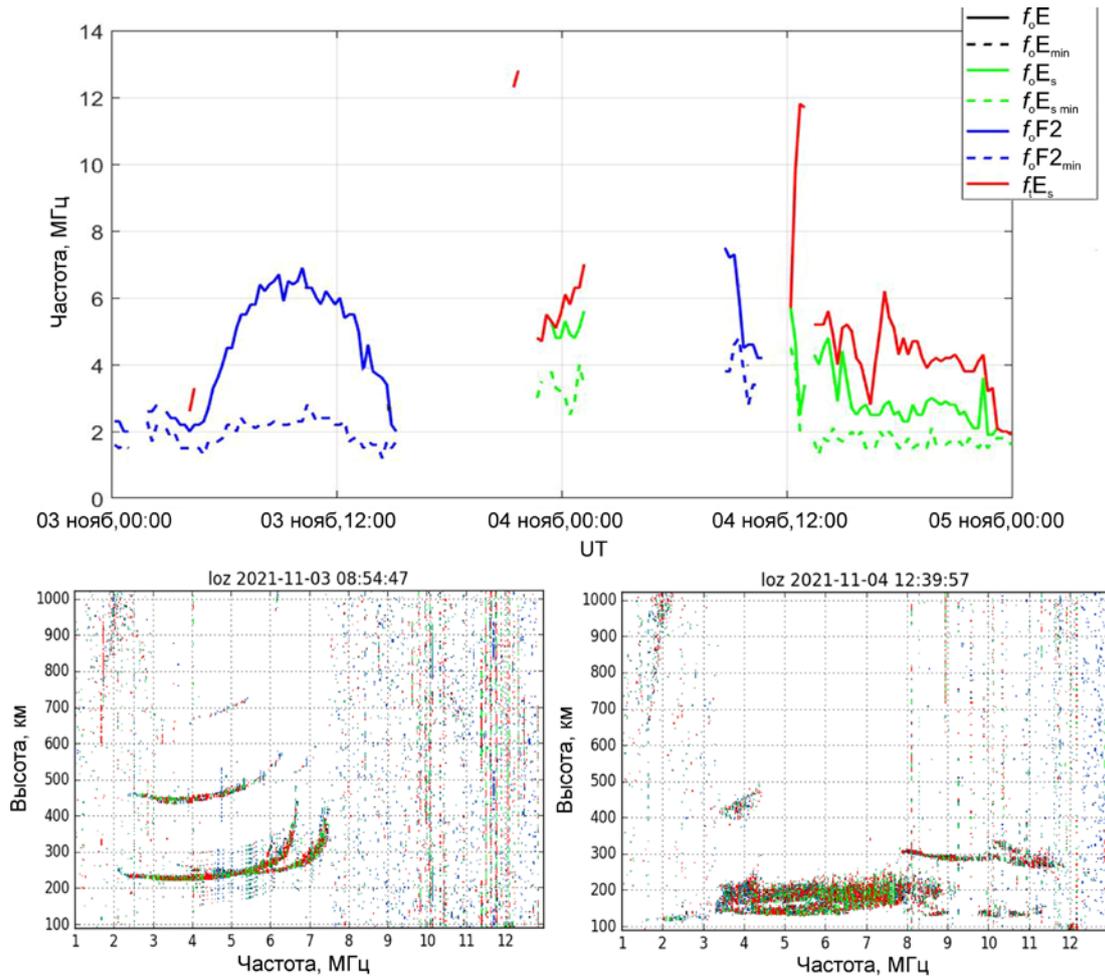


Рис. 6. Суточный ход критических частот ионосферы 3–4 ноября 2021 г., ионограммы по данным ионозонда на станции ГМС «Ловозеро», 08:54 UT 03.11.2021, 12:39 UT 04.11.2021

В дневном секторе (11–13 UT) не наблюдалось особой связи роста σ_{Φ} с усилением УНЧ-волн. По-видимому, и другие магнитосферные волновые процессы (ОНЧ-волны) вносят вклад в высыпание заряженных частиц в атмосферу.

Сопоставить резкое изменение значения фазового индекса σ_{Φ} в 21–22 UT 3 ноября 2021 г. с поведением критических частот ионосферы по данным вертикального зондирования не удалось, поскольку с 15:10 по 22:40 UT следы отражений на ионограммах отсутствовали. Однако рост σ_{Φ} в дневном секторе с 12 до 13 UT 4 ноября хорошо совпадал с образованием мощного спорадического E_s -слоя с большим количеством боковых отражений (рис. 6).

Во время этой магнитной бури на Кольском полуострове была облачная погода, поэтому для рассматриваемого события нет данных по полярным сияниям.

Сравнение σ_{Φ} на частотах $L1$ (см. рис. 5) и $L2$ (рис. 11, средняя панель) показывает также, что на $L2$ σ_{Φ} принимал более высокие значения, чем на $L1$. Так, в 20–22 UT σ_{Φ} достигал значений ~ 1.5 – 1.6 рад на $L2$ и ~ 1.2 – 1.3 рад на $L1$.

Возмущений индекса амплитудных сцинтилляций $S4$, определяемых со спутников GPS и ГЛОНАСС, во время этих возмущений не наблюдалось.

2.3. Магнитная CIR-буря

Рассмотрена магнитная буря 11–12 октября 2021 г., вызванная взаимодействием высокоскоростного СВ из корональной дыры с более медленным СВ (CIR). Интенсивность бури была средней: $SYM-H \sim -72$ нТл, $V \geq 500$ км/с, $AE \sim 2600$ нТл (рис. 7). Большие вариации $SYM-H$ были вызваны изменением B_z -компоненты ММП к положительным значениям.

По данным магнитометра LOZ (рис. 8.) последовательно наблюдались три геомагнитные суббури: в 19–23, 23–02, 02–05 UT. Наибольшую интенсивность имела третья суббуря ($\Delta X \approx 800$ нТл), сопровождавшаяся сильным геомагнитным возмущением Y -компоненты ($\Delta Y \approx 700$ нТл). Во время первых двух суббурь амплитуда геомагнитных возмущений в X -компоненте составляла ~ 600 – 700 нТл. Во время третьей суббури наблюдалось развитие вихревых токовых систем в ионосфере [Белаховский и др., 2023].

Все три суббури приводили к сильным фазовым сцинтилляциям (рис. 8) как для спутников GPS, так и для ГЛОНАСС ($\sigma_{\Phi} \approx 1.5$ – 2 рад). Для этого события также наблюдалось заметное увеличение σ_{Φ} не только в ночном секторе, но и в дневном, в 14–16 UT 12 октября 2021 г. ($\sigma_{\Phi} \approx 1.5$ рад для GPS, $\sigma_{\Phi} \approx 1.5$ – 2 рад

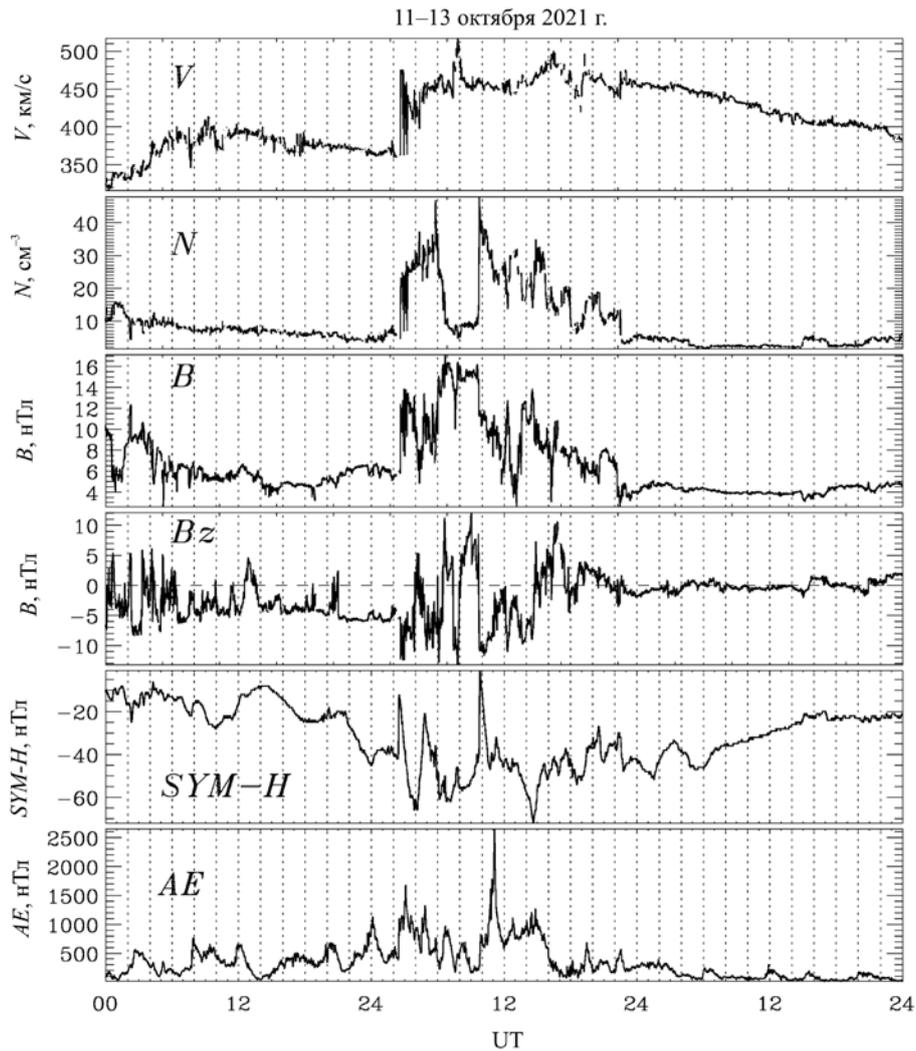


Рис. 7. Вариации скорости солнечного ветра V , плотности солнечного ветра N , модуля ММП B , B_z -компоненты ММП, $SYM-H$, AE 11–13 октября 2021 г.

для ГЛОНАСС). Увеличение σ_{Φ} в дневном секторе обусловлено положительной бухтой в магнитном поле ($\Delta X=200$ нТл).

Анализ показывает, что увеличение σ_{Φ} в целом связано с амплитудой геомагнитного возмущения. Однако для отдельных возмущений меньшее геомагнитное возмущение может приводить к большим значениям σ_{Φ} . Например, магнитная суббура в 20–21 UT 11 октября с амплитудой ~ 600 нТл (X -компонента) привела к более заметному увеличению фазовых сцинтилляций ($\sigma_{\Phi} \approx 2$ рад), чем суббура в 03–04 UT 12 октября с амплитудой 800–900 нТл ($\sigma_{\Phi} \approx 1.5$ рад).

Наиболее мощные всплески σ_{Φ} сопровождаются появлением дуг полярных сияний по данным камеры всего неба в обсерватории LOZ (рис. 9, левая и правая панели, 19:39 и 23:17 UT). Преобладание зеленой линии в спектре полярных сияний говорит о вкладе возмущений в E -слое ионосферы в рост σ_{Φ} .

При этом пульсирующие полярные сияния, для которых характерна диффузная форма, не сопровождаются ростом σ_{Φ} (рис. 9, средняя панель, 20:40 UT). Красная эмиссия во время появления пульсирующих сияний вызвана свечением молекулярного азота N_2 на высотах около 90 км.

Рост σ_{Φ} связан с ростом амплитуды УНЧ-волн (см. рис. 8, две нижние панели) в ночном и вечернем секторе. УНЧ-волны могут приводить к высыпанию авроральных частиц, вызывающих неоднородности в распределении ионосферной плазмы. Амплитуда УНЧ-волн достигала 50–60 нТл для X - и Y -компонент. Но некоторые скачки σ_{Φ} в дневном секторе (14–16 UT) не коррелируют с ростом амплитуды УНЧ-волн. По-видимому, другие волновые процессы в магнитосфере (например, ОНЧ-волны) в дневном секторе приводят к высыпанию заряженных частиц в атмосферу, росту ионосферных возмущений и сцинтилляций сигналов ГНСС.

Анализ ионограмм вертикального зондирования на станции «Ловозеро» (рис. 10) в период развития наиболее мощных фазовых сцинтилляций говорит о формировании E_s -слоя во время роста σ_{Φ} . На ионограммах наблюдаются интенсивные боковые отражения от неоднородностей на высоте E_s -области, E_s -слой имеет хорошо выраженный плоский нижний край с расслоениями и рассеянными отражениями над ним. Подобная структура ионограмм отмечается в период магнитных возмущений, сопровождаемых полярными сияниями. Период 11–12 октября характеризовался

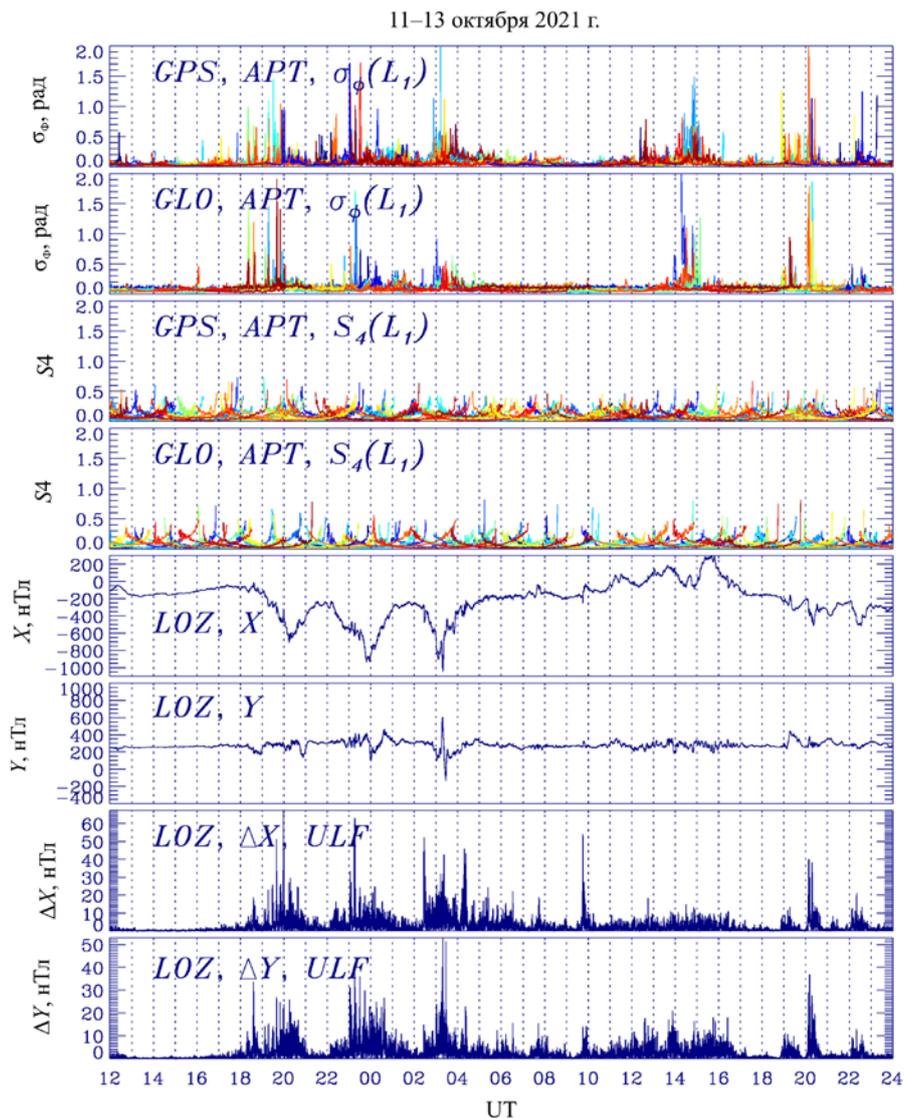


Рис. 8. Фазовый индекс цинтилляций, амплитудный индекс цинтилляций (на частоте $L1$) по данным приемника на станции АРТ (Апатиты) для спутников GPS и ГЛОНАСС; вариации X-, Y-компонент геомагнитного поля по данным обсерватории «Ловозеро»; вариации X-, Y-компонент геомагнитного поля с убраным низкочастотным трендом (0.5 мГц) по данным обсерватории «Ловозеро» для 11–12 октября 2021 г.

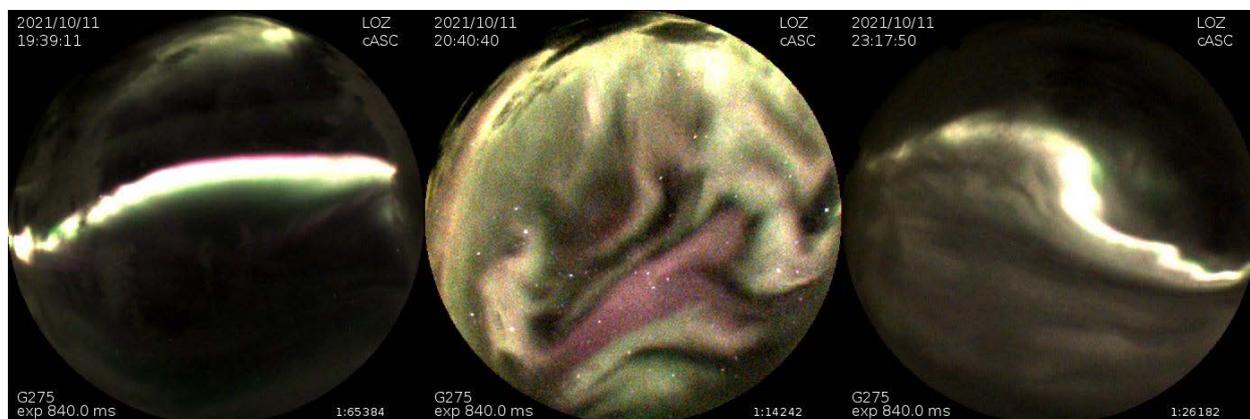


Рис. 9. Кадры камеры всего неба в обсерватории «Ловозеро» для моментов времени 19:39 UT, 20:40 UT, 23:17 UT 11.10.2021

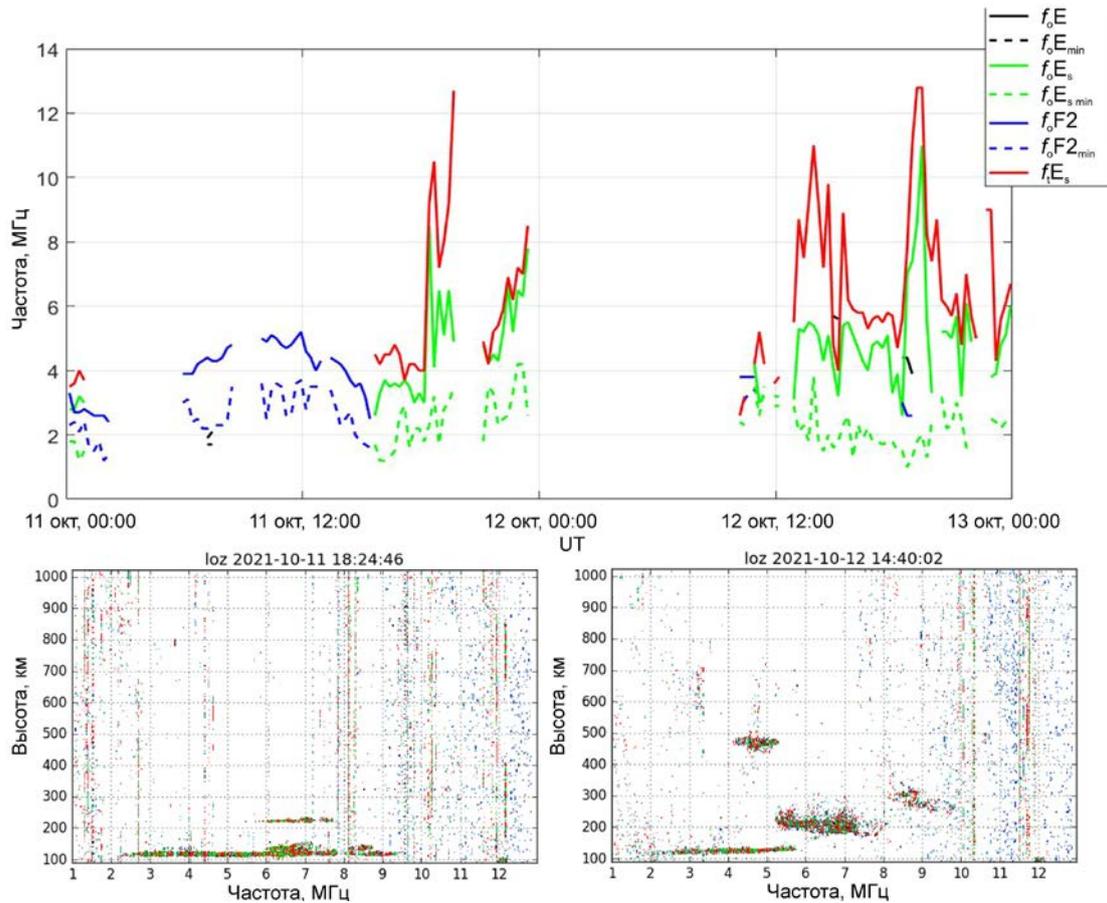


Рис. 10. Суточный ход критических частот ионосферы 11–12 октября 2021 г., ионограммы по данным ионозонда на станции ГМС «Ловозеро» 18:24 UT 11.10.2021, 14:40 UT 12.10.2021

возмущенными ионосферными условиями. В дневное время 11 октября просматривается суточный ход критической частоты слоя F2, следы отражения от слоя имеют рассеяние типа F. Минимально наблюдаемые частоты находятся в области 3 МГц, что говорит о высоком поглощении. В вечерние часы наблюдается интенсивный спорадический E_s-слой. Рост критической частоты и предельно отражаемых частот слоя E_s (см. рис. 10) в период двух первых суббурь в 19–23 и 23–02 UT хорошо коррелирует с σ_{Φ} . Во время наиболее сильного возмущения с 02 до 05 UT 12 октября наблюдалось полное поглощение зондирующих сигналов и следы отражений на ионограммах отсутствовали. Следы отражений от ионосферных слоев отсутствуют 12 октября до 12 UT. С 14 UT наблюдается интенсивный E_s с множеством боковых отражений, рост f_oF2 и f_oE с 14 до 15 UT совпадает с ростом амплитуды УНЧ-волн и σ_{Φ} .

Наблюдается некоторое различие в уровне σ_{Φ} для спутников ГЛОНАСС и GPS (см. рис. 8) как в одну, так и в другую сторону. Например, во время суббури в 02–04 UT 12 октября 2021 г. σ_{Φ} по данным ГЛОНАСС составлял ~0.8 рад, а по данным GPS — 1–2 рад. Во время суббури в 18–21 UT 11 октября 2021 г. σ_{Φ} по данным GPS составлял 1.4 рад, а по данным ГЛОНАСС — ~1.9 рад.

Уровень σ_{Φ} , определенный на частоте L2 (рис. 11, нижняя панель), несколько выше σ_{Φ} на L1 (см. рис. 8). На L2 σ_{Φ} в отдельные моменты достигает 2–2.5 рад, а на L1 $\sigma_{\Phi} < 2$ рад.

Не наблюдается отклика амплитудного индекса скинтилляций S4 на рассмотренные геомагнитные возмущения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе проанализированы скинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников по наблюдениям на Кольском полуострове, который большей частью располагается в экваториальной части аврорального овала. Ранее в работах [Van der Meeren et al., 2015; Oksavik et al., 2015] проводилось сравнение уровня скинтилляций сигналов GPS и ГЛОНАСС с использованием приемника на архипелаге Шпицберген. Было показано, что σ_{Φ} имеет достаточно близкие значения для спутников GPS, ГЛОНАСС во время суббуревых возмущений и патчей полярной шапки. Архипелаг Шпицберген располагается в более полярной части аврорального овала, сюда могут проецироваться также касп или полярная шапка. Для экваториальной же части аврорального овала такое сравнение проведено впервые. Для более экваториальной части аврорального овала такое сравнение достаточно актуально, поскольку здесь существует достаточно развитая инфраструктура и негативное влияние факторов космической погоды может быть существенным.

Нужно подчеркнуть также, что, насколько нам известно из литературы, данная работа является, пожалуй, одной из немногих, где анализируется уровень скинтилляций ГНСС-сигналов с использованием

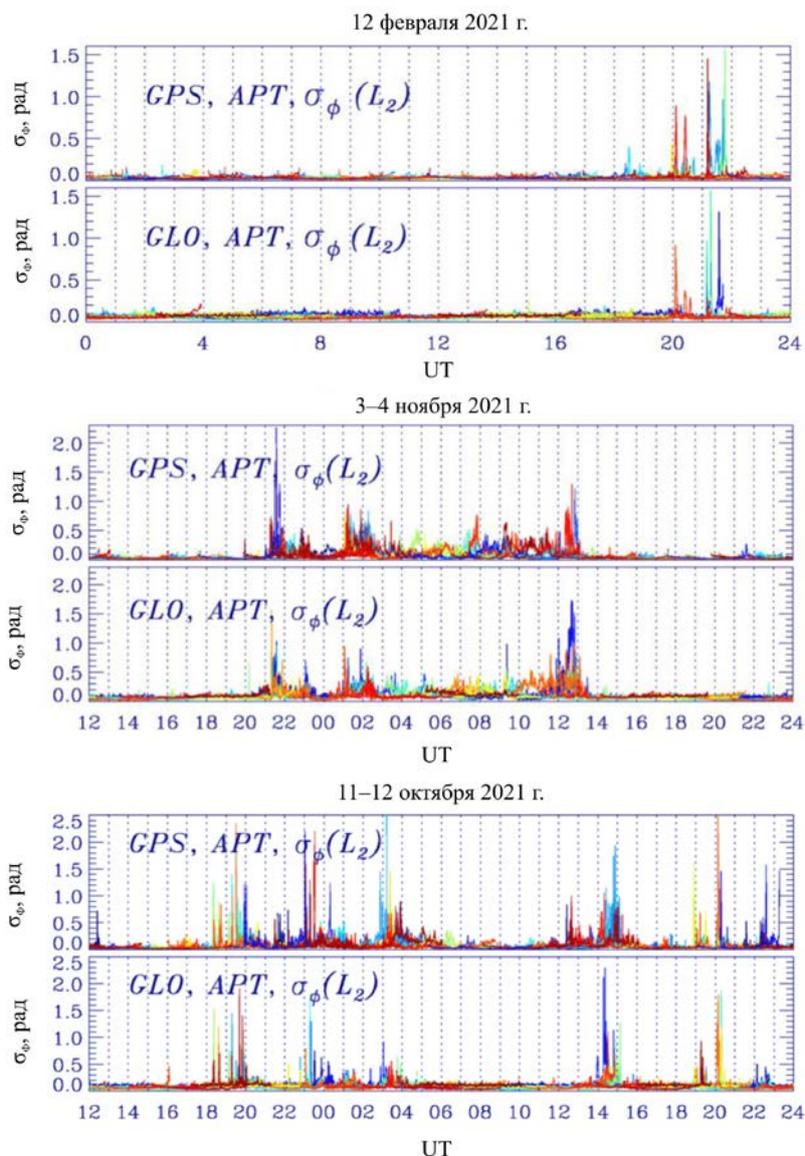


Рис. 11. Вариации фазового индекса скинтилляций на частоте L_2 для спутников GPS/ГЛОНАСС 12 февраля 2021 г., 3–4 ноября 2021 г., 11–12 октября 2021 г.

комплекса наземных инструментов, расположенных в высокоширотном регионе Российской Федерации (Кольский п-ов). Используемое геофизическое оборудование (ГНСС-приемник Septentrio, ионозонд CADI) произведено за рубежом.

В работе сравнивался уровень фазовых скинтилляций во время магнитных СМЕ- и CIR-бурь. В целом анализ показывает, что во время CIR-бури, которая имела заметно меньшую интенсивность, уровень фазовых скинтилляций имеет сопоставимые и даже большие значения, чем во время СМЕ-бури ($\sigma_\phi \approx 1.8$ рад). В работе [Edemskiy, Yasuykevich, 2022] рассматривался параметр, схожий с σ_ϕ ROTI. Сравнивались флуктуации ROTI во время СМЕ-бурь и HSS (high speed streams) в области аврорального овала с использованием ROTI-кеограмм, построенных по данным сетей GPS-приемников. Анализ показал, что наибольшие значения ROTI наблюдались в главную фазу бурь, при этом СМЕ-бури приводят к бо-

лее высоким значениям ROTI, чем HSS. Поэтому рассмотренные в данной статье два события СМЕ- и CIR-бурь, скорее, несколько выделяются из общей статистики.

Сравнение рассмотренных СМЕ-бури 3–4 ноября 2021 г. и CIR-бури 11–13 октября 2021 г. с точки зрения другого фактора космической погоды — геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) — было проведено в работе [Белаховский и др., 2023]. Было показано, что CIR-буря приводит к большим значениям ГИТ (практически в два раза), чем СМЕ-буря. Подобное различие в величине ГИТ связывали с развитием вихревых токовых систем в ионосфере. Это означает, что CIR-бурю нужно учитывать с точки зрения различных проявлений космической погоды: роста ГИТ и ионосферных скинтилляций.

Заметное различие в уровне фазовых скинтилляций по данным спутников ГЛОНАСС и GPS в отдельных случаях может быть связано с различными

орбитами спутников и прохождением сигналов через локальные ионосферные возмущения по разным траекториям. Нам представляется, что различие в уровне фазовых сцинтилляций для спутников GPS и ГЛОНАСС вряд ли связано с различием в частотах сигналов этих систем, поскольку частоты $L1$ -диапазона на спутниках GPS и ГЛОНАСС достаточно близки (для GPS $L1=1575.42$ МГц, для ГЛОНАСС $L1=1602$ МГц). При этом в одних случаях выше уровень сцинтилляций для ГЛОНАСС, в других — для GPS. Разница между $L1$ и $L2$ заметно больше, чем разница между $L1$ на GPS и ГЛОНАСС. При этом уровень сцинтилляций на $L2$ во всех рассмотренных случаях превосходит уровень сцинтилляций на $L1$ примерно на 20 %.

Наш анализ показывает, что уровень сцинтилляций для спутников ГЛОНАСС и GPS на $L2$ для рассмотренных событий выше, чем на $L1$. Данный результат согласуется с результатами, полученными ранее в работах [Захаров и др., 2016; Chernyshov et al., 2020]. На основе статистического анализа сигналов системы GPS за 2010–2014 гг. для станций сетей IGS и CHAIN, расположенных в Арктическом регионе (севернее 55° N), было показано, что вероятность сбоев по фазе $L2$ больше, чем по фазе $L1$ почти до 10 раз для магнитных бурь и суббурь класса G3. С ростом интенсивности бури это соотношение несколько уменьшается — до 5–7 раз. Аналогичные соотношения получены и для вероятностей сбоев по псевдодальности.

Наш анализ показывает, что наибольший рост σ_f для рассмотренных событий происходит во время взрывной фазы суббури. Сравнение уровня фазовых сцинтилляций с динамикой полярных сияний показало, что дискретные формы полярных сияний (дуги, полосы) сопровождаются наибольшими значениями σ_f . Преобладание ярких дискретных форм сияний в зеленой линии (557.7 нм) по данным камеры всего неба в обсерватории «Ловозеро» во время событий с высокими значениями σ_f позволяет сделать вывод о наибольшем вкладе возмущений в E-слое ионосферы в рост сцинтилляций. Отсутствие ярких сияний в красной линии (630.0 нм) выше 200 км во время появления дискретных форм говорит об отсутствии сильных возмущений в F-области ионосферы.

При этом пульсирующие полярные сияния, наблюдаемые на восстановительной фазе геомагнитных возмущений, как было показано для CIR-бури 11–12 октября 2021 г., не приводят к заметному росту σ_f . Считается, что пульсирующие полярные сияния вызываются высыпанием в атмосферу более энергичных электронов релятивистских (субрелятивистских) энергий [Miyoshi et al., 2015]. Таким образом, ионизация D-слоя ионосферы высокоэнергичными электронами не приводит к заметному росту ГНСС-сцинтилляций.

Анализ данных ионограмм подтверждает формирование E_s -слоя в период развития наиболее мощных сцинтилляций. При этом нужно сказать, что данные ионозонда были доступны не для всех скачков σ_f вследствие поглощения излучаемых ионозондом радиоволн при высокой ионизации ионосферы. Анализ показывает коррелированный с σ_f рост кри-

тической частоты и предельно отражаемых частот слоя E_s . Безусловно, при отражении сигнала ионозонда от E_s -слоя возмущения в F-области ионосферы не будут видны. Но комбинация данных ионозонда с оптическими данными по полярным сияниям (преобладание зеленой линии) позволяет сделать вывод о наибольшем вкладе возмущений в E-области ионосферы в рост фазовых сцинтилляций. Это согласуется с результатами, полученными в работах [Belakhovsky et al., 2021; Makarevich et al., 2021].

Конечно, использование радара некогерентного рассеяния позволило бы более детально проанализировать вклад ионосферных слоев в рост сцинтилляций. К сожалению, на территории РФ в высоких широтах нет радаров подобного класса. Использование радаров некогерентного рассеяния EISCAT в Тромсё (UHF, VHF), расположенных примерно в 630 км от г. Апатиты, могло бы дать косвенное свидетельство о вкладе ионосферных возмущений в рост ГНСС-сцинтилляций. Но радар EISCAT работает достаточно нерегулярно из-за высокой стоимости подобных измерений, и в 2021 г. не было подходящих случаев с данными радара EISCAT в Тромсё. Ранее в работах [Makarevich et al., 2021; Belakhovsky et al., 2021] с использованием радаров некогерентного рассеяния EISCAT 42m и PFISR было показано, что ионосферные возмущения в E-слое ионосферы приводят к заметно более существенным фазовым сцинтилляциям, чем возмущения в F-области ионосферы.

Ранее во многих работах [Smith et al., 2008; Prikryl et al., 2010] рассматривался рост фазовых GPS-сцинтилляций во время отрицательной магнитной бухты, связанной с развитием западного электроджета. Действительно, анализ данных за 2021 г. показал, что в большинстве случаев рост фазовых сцинтилляций происходит во время ночных геомагнитных возмущений. Однако во время магнитных бурь положительные магнитные бухты, связанные с усилением восточного электроджета [D’Onofrio et al., 2014], приводят к вполне сопоставимому росту фазовых сцинтилляций. Это необходимо учитывать при оценке влияния космической погоды на навигационные системы и системы связи в высоких широтах.

Сравнение фазовых сцинтилляций с геомагнитной УНЧ (Pc5/Pi3) волновой активностью показало их тесную связь для ночных и вечерних возмущений. Для дневных УНЧ-возмущений такой четкой связи не наблюдается. По всей видимости, в дневном секторе к высыпанию заряженных частиц в ионосферу приводят и волновые возмущения в магнитосфере других типов (ОНЧ-волны) [Thorne et al., 2010]. Связь роста УНЧ-волн с ростом ионосферных сцинтилляций и с появлением дуг полярных сияний может говорить о существенном вкладе УНЧ-волн, возбуждаемых за счет резонанса силовых линий (FLR — field line resonance) внутри магнитосферы, в высыпание заряженных частиц в атмосферу и в формирование дуг полярных сияний [Lyatsky et al., 1999; Белаховский и др., 2016].

Приход МВВ к земной магнитосфере сопровождается импульсом SC (SI) и может приводить к развитию целого комплекса явлений в магнитосфере и ионосфере [Belakhovsky et al., 2017]. Однако рас-

смотренный пример магнитной бури 3–4 ноября 2021 г. показывает, что SSC-импульс не вызвал заметного роста фазовых и амплитудных сцинтилляций ГЛОНАСС и GPS-сигналов. По-видимому, эффект воздействия МУВ зависит от совокупности условий, включая локальное время.

Существует точка зрения, что отсутствие реакции амплитудного индекса сцинтилляций на геомагнитные возмущения различных типов может быть связано с особенностями расчета индексов для высокоширотной ионосферы. В программных модулях сцинтилляционных приемников ГНСС используется стандартная методика подсчета индексов сцинтилляций. Для вычитания низкочастотного тренда, связанного с движением спутника относительно приемника, используется нижняя частота фильтрации 0.1 Гц. Для высокоширотной ионосферы характерны большие значения скорости ионосферной конвекции (100–1500 м/с), что также вносит большой вклад в рефракцию сигнала. В частности, это может приводить к высоким значениям σ_f при отсутствии амплитудных сцинтилляций возмущений (“phase without amplitude scintillations”) [Forte, 2005; Mushini et al., 2012]. Чтобы избежать этого эффекта, необходимо подбирать оптимальную нижнюю частоту фильтрации. Многие исследователи для решения этой проблемы создали собственные индексы сцинтилляций [Mushini et al., 2012; Forte, 2005].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведена оценка влияния геомагнитных, авроральных возмущений на сцинтилляции сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS во время изолированной суббури, а также во время магнитных СМЕ- и CIR-бурь с использованием приемника Septentrio PolaRx5 в Апатитах (Мурманская область, Россия).

Анализ показывает, что наибольший рост ГЛОНАСС/GPS фазовых сцинтилляций ($\sigma_f \approx 2$) происходит во время ночных и вечерних суббурь, сопровождающихся отрицательными магнитными бухтами, вызванными развитием западного электроджета. Однако во время магнитных бурь положительные бухты в дневном секторе вследствие развития восточного электроджета могут приводить к вполне сопоставимому уровню сцинтилляций. Приход МУВ не вызвал заметного роста фазовых сцинтилляций. Во время CIR-бури, несмотря на ее меньшую интенсивность, уровень фазовых сцинтилляций имеет вполне сопоставимые и даже большие значения, чем во время СМЕ-бури.

Показана связь уровня фазовых сцинтилляций с ростом амплитуды УНЧ-волн (P3/Pc5) в ночном (вечернем) секторе и с появлением дуг полярных сияний. Это подтверждает важную роль УНЧ-волн в формировании авроральной дуги и в развитии 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 вертикаль-

ного зондирования на станции УГМС «Ловозеро» говорит о формировании спорадического E_s-слоя во время наибольшего роста фазового индекса сцинтилляций, что позволяет сделать вывод о вкладе E_s-слоя в рост фазовых сцинтилляций. Анализ показывает коррелированный с σ_f рост критической частоты и предельно отражаемых частот слоя E_s.

Пульсирующие полярные сияния, вызываемые высыпанием электронов субрелятивистских (релятивистских) энергий и характеризующиеся диффузными формами, не сопровождаются заметным ростом фазовых сцинтилляций, что может говорить об отсутствии вклада возмущений в D-слое ионосферы в рост фазовых сцинтилляций.

Показано заметное различие в уровне фазовых сцинтилляций по данным спутников ГЛОНАСС и GPS, что, вероятно, связано с различными орбитами спутников и прохождением сигналов через локальные ионосферные возмущения по разным траекториям. При этом уровень ГЛОНАСС/GPS сцинтилляций на частоте L2 несколько больше, чем на L1.

Увеличения амплитудных сцинтилляций GPS/ГЛОНАСС во время рассматриваемых событий не обнаружено.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н., Лоренцен Д. Особенности пульсаций Pc5-диапазона в геомагнитном поле, авроральной светимости и риометрическом поглощении. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2016. Т. 56, № 1. С. 46–63.

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. DOI: [10.31857/S0367676522030061](https://doi.org/10.31857/S0367676522030061).

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Рост геомагнитно-индуцированных токов во время геомагнитных бурь, вызванных корональным выбросом массы и высокоскоростным потоком солнечного ветра, в 2021 г. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2023. Т. 87, № 2. С. 264–270.

Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. Влияние магнитных бурь и суббурь на сбои навигационной системы GPS в высоких широтах. *Космические исследования*. 2016. Т. 54, № 1. С. 23–33.

Захаров В.И., Чернышов А.А., Милош В., Джин Я. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2020. Т. 60, № 6. С. 769–782.

Козелов Б.В., Черноус С.А., Шагимурагов И.И. и др. Гелиогеофизические факторы, влияние которых могло обусловить ошибки в работе GPS в период военных учений НАТО «Trident Juncture» с 25.10.2018 по 7.11.2018. *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLII Annual Seminar*. 2019. P. 48–52.

Черноус С.А., Швец М.В., Филатов М.В. и др. Исследование особенностей навигационных сигналов в период авроральных возмущений. *Химическая физика*. 2015. Т. 34, № 10. С. 33–39.

Черноус С.А., Шагимурагов И.И., Иевенко И.Б. и др. Авроральные возмущения как индикатор воздействия

ионосферы на навигационные сигналы. *Химическая физика*. 2018. Т. 37, № 5. С. 77–83.

Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И., Флуктуации полного электромагнитного содержания и ошибки GPS-позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 г. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85, № 3. С. 433–439. DOI: [10.31857/S036767652103025X](https://doi.org/10.31857/S036767652103025X).

Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Ясюкевич А.С. и др. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на свои глобальных навигационных спутниковых систем. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 1. С. 88–98.

Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. *Space Weather*. 2014. Vol. 12, iss. 7. P. 508–525. DOI: [10.1002/2014SW001072](https://doi.org/10.1002/2014SW001072).

Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64, no. 16. P. 1745–1754.

Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Ya.A., et al. Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. *Earth, Planets and Space*. 2017. Vol. 69, iss. 1. Article id. #105. 25 p.

Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W. Influence of the substorm precipitation and polar cap patches on GPS signals at high latitudes. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. Vol. 17, no. 6. P. 139–144. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-6-139-144](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-139-144).

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. P. 687–700.

Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, iss. A7. A07S08. DOI: [10.1029/2005JA011447](https://doi.org/10.1029/2005JA011447).

Cherniak I., Krankowski A., Zakharenkova I. Observation of the ionospheric irregularities over the Northern Hemisphere: Methodology and service. *Radio Sci.* 2014. Vol. 49. P. 653–662. DOI: [10.1002/2014RS005433](https://doi.org/10.1002/2014RS005433).

Chernyshov A.A., Miloch W.J., Jin Y., Zakharov V.I. Relationship between TEC jumps and auroral substorm in the high-latitude ionosphere. *Scientific Rep.* 2020. Vol. 10. Article id. 6363. DOI: [10.1038/s41598-020-63422-9](https://doi.org/10.1038/s41598-020-63422-9).

D’Onofrio M., Partamies N., Tanskanen E. Eastward electrojet enhancements during substorm activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 119. P. 129–137.

Edemskiy I.K., Yasyukevich Y.V. Auroral oval boundary dynamics on the nature of geomagnetic storm. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 21. P. 5486. DOI: [10.3390/rs14215486](https://doi.org/10.3390/rs14215486).

Forte B. Optimum detrending of raw GPS data for scintillation measurements at auroral latitudes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. Vol. 67. P. 1100–1109. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.011).

Gao S., MacDougall J. A dynamic ionosonde design using pulse coding. *Can. J. Phys.* 1991. Vol. 68. P. 1184.

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, iss. A4. P. 5771–5792.

Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. GPS and ionospheric scintillations. *Space Weather*. 2007. Vol. 5. P. S0900.

Kokubun S., McPherron R.L., Russell C.T. Triggering of substorms by solar wind discontinuities. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. P. 74–86.

Lyatsky W., Elphinstone R.D., Pao Q., Cogger L.L. Field line resonance interference model for multiple auroral arc generation. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, iss. A1. P. 263–268. DOI: [10.1029/1998JA900027](https://doi.org/10.1029/1998JA900027).

Makarevich R.A., Crowley G., Azeem I., et al. Auroral E-region as a source region for ionospheric scintillation. *J. Geophys. Res.* 2021. Vol. 126. P. e2021JA029212. DOI: [10.1029/2021JA029212](https://doi.org/10.1029/2021JA029212).

Mushini S.C., Jayachandran P.T., Langley R.B., et al. Improved amplitude and phase-scintillation indices derived from wavelet detrended high-latitude GPS data. *GPS Solutions*. 2012. Vol. 16. P. 363–373. DOI: [10.1007/s10291-011-0238-4](https://doi.org/10.1007/s10291-011-0238-4).

Miyoshi Y., Oyama S., Saito S., et al. Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations. *J. Geophys. Res.* 2015, Vol. 120. P. 2754–2766. DOI: [10.1002/2014JA020690](https://doi.org/10.1002/2014JA020690).

Oksavik K., Van der Meeren C., Lorentzen D.A., et al. Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120. P. 9161–9175. DOI: [10.1002/2015JA021528](https://doi.org/10.1002/2015JA021528).

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.* 2010. Vol. 28. P. 1307–1316.

Smith A.M., Mitchell C.N., Watson R.J., et al. GPS scintillation in the high arctic associated with an auroral arc. *Space Weather*. 2008. Vol. 6. P. s03d01. DOI: [10.1029/2007SW000349](https://doi.org/10.1029/2007SW000349).

Thorne R.M., Ni B., Tao X., et al. Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation. *Nature*. 2010. Vol. 467. P. 943–946. DOI: [10.1038/nature09467](https://doi.org/10.1038/nature09467).

Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D.A., et al. Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora. *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120, iss. 12. P. 10607–10621.

Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proc. IEEE*. 1982. Vol. 70, no. 4. P. 24–64. DOI: [10.1109/PROC.1982.12313](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12313).

Как цитировать эту статью:

Белаховский В.Б., Будников П.А., Калишин А.С., Пильгаев С.В., Ролдугин А.В. Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников по данным наблюдений на Кольском полуострове. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 58–72. DOI: [10.12737/szf-93202307](https://doi.org/10.12737/szf-93202307).