

УДК 551.510.535

СЦИНТИЛЛЯЦИИ ГЛОНАСС/GPS-СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 23–24 МАРТА 2023 ГОДА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

© 2024 г. В. Б. Белаховский¹, *, А. Е. Васильев², А. С. Калишин³, А. В. Ролдугин¹

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт прикладной геофизики имени академика
Е. К. Федорова”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение “Арктический и антарктический научно-
исследовательский институт”,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: belakhov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Проанализирован рост сцинтилляций сигналов ГЛОНАСС и GPS-спутников с использованием ГНСС-приемника Septentrio, установленного в городе Апатиты, во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. По данным ионозонда на станции “Ловозеро” и данным радара EISCAT в Тромсё показано, что рост фазовых сцинтилляций вызван ростом концентрации плазмы преимущественно в E-слое ионосферы. Рост фазовых сцинтилляций сопровождается появлением дискретных форм полярных сияний.

DOI: 10.31857/S0367676524030117, EDN: QMCQSU

ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотные ионосферные возмущения оказывают негативное влияние на распространение сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Неоднородности в распределении плотности (порядка 1-й зоны Френеля, 100–300 м для единиц ГГц) ионосферной плазмы могут привести к быстрым флуктуациям амплитуды и фазы сигнала ГНСС, известным как ионосферные сцинтилляции или мерцания [1, 2]. Сильные сцинтилляции снижают качество сигнала и даже приводят к его потере. Уровень сцинтилляций характеризуется индексами сцинтилляций. Наиболее распространенные индексы — σ_f (фазовый индекс) и S4 (амплитудный индекс). 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 [2, 3].

Для аврорального овала характерен высокий уровень турбулентности плазмы. Так, наибольшее количество сбоев при определении ПЭС (полное электронное содержание) в периоды геомагнитных бурь

наблюдается вблизи аврорального овала [4]. Было показано с использованием модели аврорального овала, созданной в рамках норвежско-российского проекта NORUSKA (<https://www.unis.no/news/aurora-forecast-3d>), что динамика овала и динамика пространственно-временного распределения флуктуаций TEC (total electron content) в области овала подобны [5]. При этом имеется хорошее соответствие в положениях аврорального овала и овала неоднородностей. Имеющееся расхождение может быть обусловлено тем, что авроральный овал проектируется на высоту 110 км, а овал неоднородностей — на высоту 450 км. При этом не учитывается искривление магнитных силовых линий. Обнаружено [6], что лучистые дуги полярных сияний являются хорошим индикатором нарушений в работе навигационных систем. В работе [7] было показано, что флуктуации TEC, вызванные появлением полярных сияний, приводят к ошибкам в позиционировании более 20 м (при прохождении через дугу полярных сияний). Была отмечена связь роста фазовых сцинтилляций, определяемых по данным GPS-спутников, с ростом суббулевой активности [8, 9]. Отмечается тесная связь роста фазовых сцинтилляций с вариациями ROT (rate of TEC) [10, 11].

В серии недавних работ [11–13] по наблюдениям на архипелаге Шпицберген с использованием данных радара EISCAT 42m было показано, что среди различных типов ионосферных возмущений суббуревые возмущения приводят к наиболее высоким значениям σ_{Φ} .

В высоких широтах плотность сбоев измерения псевдодальности P1 для ГЛОНАСС ниже, чем для GPS [14]. На средних широтах, напротив, стабильность измерения псевдодальности на основной частоте для GPS выше, чем для ГЛОНАСС. При этом вероятность фазового сбоя на частоте L2 даже в спокойных условиях приема больше от 3 до 15 раз, чем вероятность фазового сбоя на частоте L1 [15, 16].

25-й цикл солнечной активности подарил в первой половине 2023 г. ряд сильных геомагнитных бурь. Одним из наиболее ярких событий стала магнитная буря 23–24 марта 2023 г.

В данной работе проанализирован вклад ионосферных возмущений в рост сцинтилляций сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS, регистрируемых по данным приемника в городе Апатиты, во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Мы использовали данные ГНСС-приемника Septentrio PolaRx5S, установленного на крыше здания Полярного геофизического института (г. Апатиты). Географические и геомагнитные координаты г. Апатиты (АПТ) — [67.58° с.ш., 33.31° в.д.], [63.86° с.ш., 112.9° в.д.]. Сам приемник ГНСС Septentrio PolaRx5S приобретен и находится под управлением Института прикладной геофизики имени Е. К. Федорова (г. Москва). Сцинтилляционный ГНСС-приемник автоматически рассчитывает фазовый (σ_{Φ}) и амплитудный (S4) индексы сцинтилляций, полное электронное содержание ионосферы для спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. 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.

Подобные сцинтилляционные измерения сигналов ГНСС на протяжении примерно 1.5 лет являются уникальными для арктической зоны Российской Федерации и, пожалуй, единственными на протяжении такого продолжительного интервала.

Использованы данные магнитометра ПГИ в обсерватории “Ловозеро” (LOZ), имеющей следующие географические и геомагнитные координаты: [67.97° с.ш., 35.02° в.д.], [64.22° с.ш., 114.6° в.д.].

Также использованы данные магнитометров сети IMAGE (Скандинавия).

Для определения параметров ионосферной плазмы (концентрации, температуры ионов, электронов, скорости) использованы данные радара EISCAT UHF в Тромсё (Норвегия), луч которого направлен вдоль магнитного поля Земли. Радар EISCAT расположен примерно в 630 км от г. Апатиты. Однако для исследования крупномасштабных ионосферных возмущений, связанных с суббурями, использование данных измерений вполне корректно.

Использован ионозонд вертикального зондирования CADI (Canadian advanced digital ionosonde), установленный на гидрометеорологической станции (ГМС) “Ловозеро”. Зондирование проводится в диапазоне частот от 1 до 18 МГц, импульсная мощность излучения не превышает 600 Вт. Зондирующий сигнал представляет собой 13-битную кодовую последовательность Баркера с четырехкратным повторением. Антенная система комплекса состоит из двух широкополосных “дельта-полотен”, расположенных ортогонально. Одна дельтаобразная антенна является приемной, другая — передающей.

Использованы оптические наблюдения полярных сияний с использованием камеры всего неба в обсерватории ПГИ “Ловозеро”, которые также использовались для идентификации ионосферных возмущений.

Для определения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) использованы данные базы OMNI. Для характеристики уровня геомагнитной активности использовались индексы SYM-H, AE.

МАГНИТНАЯ БУРЯ 23–24 МАРТА 2023 ГОДА

Параметры межпланетной среды, геофизическая обстановка

Магнитная буря 23–24 марта 2023 г. стала одной из наиболее сильных магнитных бурь за последний пять лет ($Dst = -163$ нТл, $SYM-H = -170$ нТл). Данная буря является нетипичной для CME (coronal mass ejection) бури: начало магнитной бури не сопровождалось приходом межпланетной ударной волны. Примерно в 14 UT был зафиксирован приход тангенциального разрыва, который характеризовался резким ростом модуля ММП B и резким уменьшением концентрации солнечного ветра, по данным базы OMNI (рис. 1). Данная буря могла быть вызвана взаимодействием края магнитного облака с магнитосферой Земли (ripple effect). Вследствие эффекта Рассела—Макферона относительно небольшое возмущение в солнечном ветре в период равноденствия могло стать причиной сильной магнитной бури [17].

B_z -компонента ММП несколько раз меняла знак и достигала максимальных значений — порядка -17 нТл. В главную фазу бури B_z -компонента ММП имела отрицательные значения в течение более 14 ч (с 17.30 до 08 UT). Скорость солнечного ветра во время данной бури имела средние значения — порядка 500 км/с. Во время главной фазы бури

скорость уменьшилась до 450 км/с, при этом наблюдался плавный рост плотности солнечного ветра N до 45 см^{-3} . AE-индекс достигал значения 2600 нТл в начальную фазу магнитной бури, в главную фазу бури величина AE-индекса упала до 900—1000 нТл.

По данным магнитометра LOZ (рис. 2) суббуревая активность в виде последовательных отрицательных

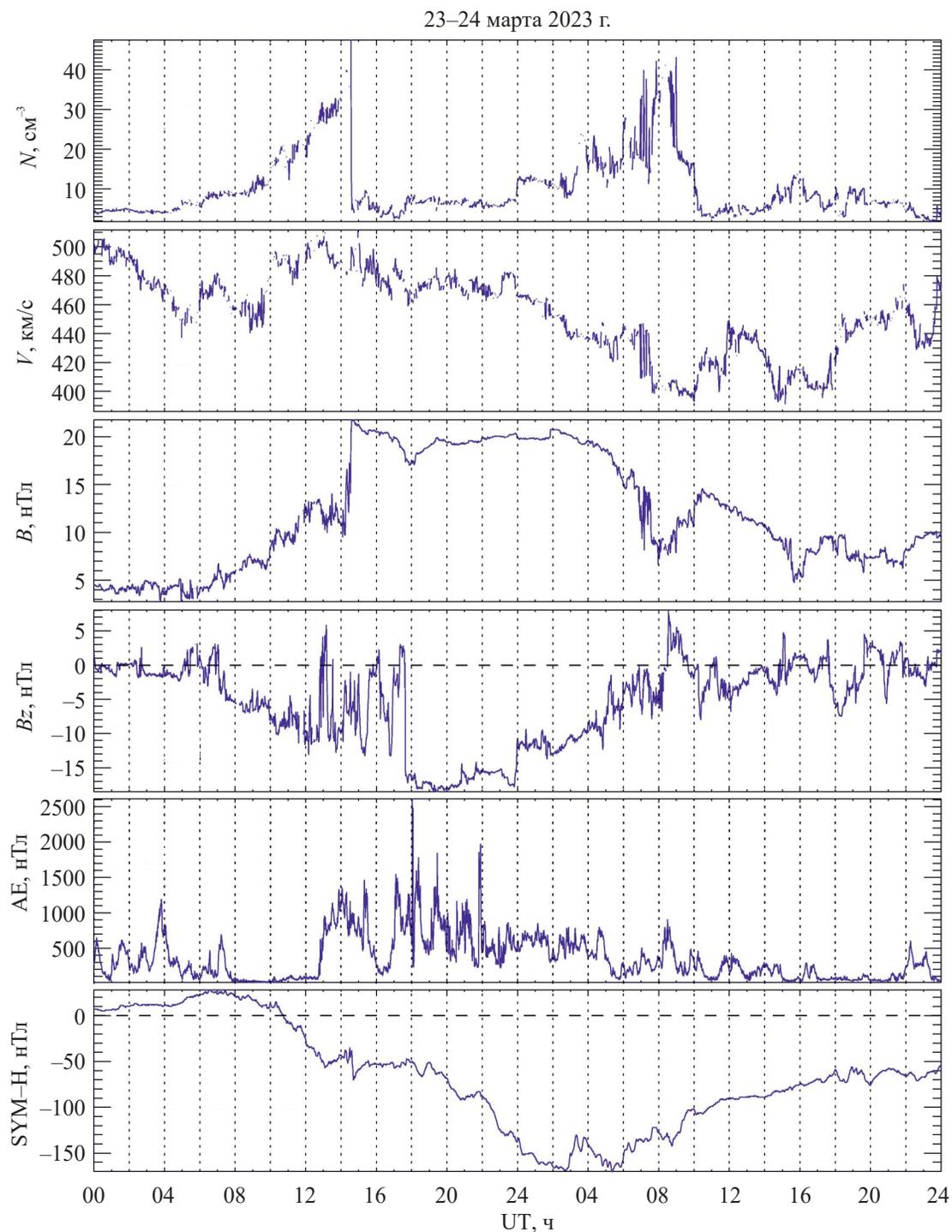


Рис. 1. Вариации скорости V , плотности N солнечного ветра, модуля ММП B , B_z -компоненты ММП, AE-индекса, SYM-H-индекса для 23–24 марта 2023 г.

бухт в X -компоненте геомагнитного поля наблюдалась с 18 UT 23 марта до 06 UT 24 марта. Амплитуда наиболее мощной суббури в 00–02 UT достигала 1600 нТл. Появление данных суббурь произошло в период наибольшей интенсивности магнитной бури (минимум SYM-H-индекса). Положительная бухта в магнитном поле, связанная

с развитием восточного электроджета, была зарегистрирована в 10–16 UT. Также небольшая суббуря ($\Delta X \approx 600$ нТл) была зарегистрирована в 20 UT.

По данным меридиональной цепочки магнитометров сети IMAGE (не показано) наибольшая величина суббурного возмущения наблюдалась

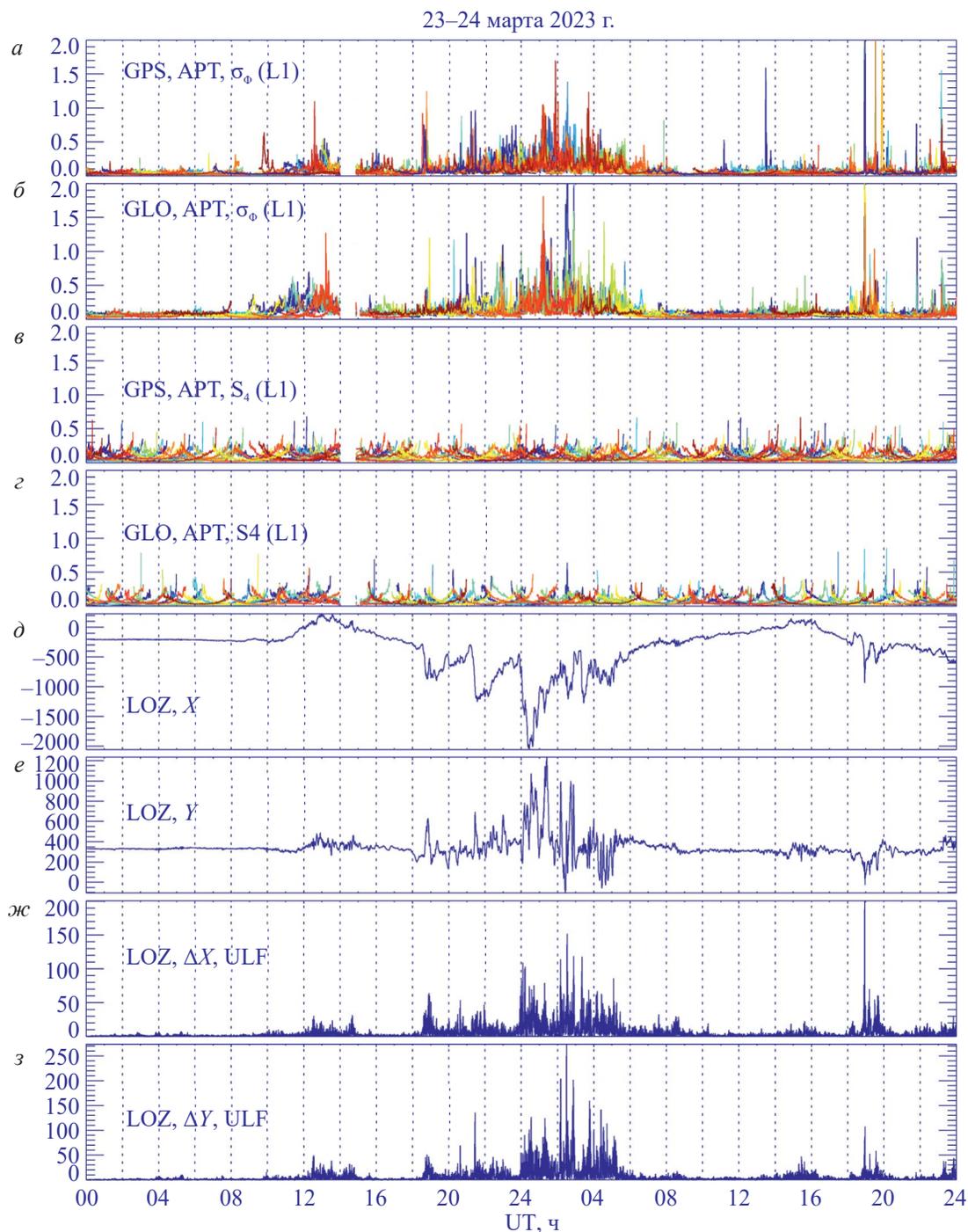


Рис. 2. Фазовый (σ_ϕ), амплитудный (S_4) индексы сцинтилляций на частоте L1 по данным приемника на станции АРТ (Апатиты) для спутников GPS и ГЛОНАСС; вариации X -, Y -компонент геомагнитного поля по данным обсерватории “Ловозеро”, вариации X -, Y -компонент геомагнитного поля с убраным низкочастотным трендом (0.5 МГц) по данным обсерватории “Ловозеро” для 23–24 марта 2023 г.

в районе 00 UT 23–24 марта 2023 г. на станциях OJY [CGM Lat — 60.99°, CGM Lon — 106.14°], RAN [CGM Lat — 62.09°, CGM Lon — 105.91°], где $\Delta X > 1500$ нТл. Это говорит о заметном расширении аврорального овала на более низкие широты во время данной магнитной бури.

Анализ сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS

На рис. 2 (панели *a–z*) показаны вариации фазового (σ_f) и амплитудного (S4) индексов сцинтилляций по данным спутников GPS и ГЛОНАСС. Разными цветами показаны значения σ_f и S4 по данным различных ГЛОНАСС/GPS-спутников.

Наибольший рост фазовых сцинтилляций сигналов GPS- и ГЛОНАСС-спутников ($\sigma_f > 1.5$ радиана) наблюдался в вечернем и ночном секторе (22–02 UT) во время повторяющихся суббурь. Также заметный рост фазовых сцинтилляций ($\sigma_f \approx 1$ радиан) наблюдался в 10–14 UT и был связан с положительной магнитной бурей. Интересно, что относительно небольшая по интенсивности суббуря ($\Delta X \approx 600$ нТл) в 18–20 UT вызвала сильный рост фазовых сцинтилляций ($\sigma_f \approx 2$ радиана).

Анализ показывает, что не наблюдается отклика амплитудного индекса сцинтилляций (S4) на рассмотренные геомагнитные возмущения. Эффект отсутствия отклика S4 при заметном росте σ_f в высоких широтах в литературе называют “phase without amplitude scintillations” [18, 19]. Ряд авторов полагают, что данный эффект может быть связан с особенностями стандартной методики расчета индексов сцинтилляций, используемой большинством ГНСС-приемников, которая не учитывает особенности высокоширотной ионосферы, а именно, большие значения скорости ионосферной конвекции (100–1500 м/с). Это может приводить к заметному вкладу в S4 возмущений, связанных с рефракцией ГНСС-сигнала. Чтобы избежать этого эффекта, предлагается подбирать оптимальную нижнюю частоту фильтрации. Многие исследователи для решения этой проблемы создали собственные индексы сцинтилляций [18, 19].

Для определения вклада УНЧ (ультранизкочастотных) волновых геомагнитных возмущений (Pc5/Pi3-диапазона) в рост сцинтилляций 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_f . Это может говорить о вкладе УНЧ-волн в высыпание заряженных частиц (электронов, протонов) в высокоширотную ионосферу [20, 21]. Высыпание заряженных частиц приводит к появлению ионосферных неоднородностей различных пространственных масштабов, что и приводит к росту сцинтилляций сигналов ГНСС.

В целом вариации значений σ_f для ГЛОНАСС/GPS-спутников в период возмущений достаточно близки (см. рис. 2). Хотя наблюдаются некоторые отличия в уровне сцинтилляций как в одну, так и в другую сторону, что может быть связано с наличием локальных ионосферных неоднородностей и различием в орбитах спутников GPS и ГЛОНАСС. Орбита спутников ГЛОНАСС имеет большее наклонение (64.8°), чем орбита спутников GPS (55°), что делает их более подходящими для исследования высокоширотной ионосферы. Подобное различие в уровне сцинтилляций для спутников ГЛОНАСС и GPS вряд ли связано с различием в частотах, на которых работают эти спутники, 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. Анализ данных показывает, что уровень σ_f , определенный на частоте L2, несколько выше σ_f на частоте L1 (не показано). Так, на частоте L2 σ_f в отдельные моменты достигает 2–2.5 радиан, а на частоте L1 σ_f имеет значения менее 2 радиан.

Возмущения параметров ионосферы

Для определения вклада различных ионосферных возмущений в рост ГНСС-сцинтилляций были проанализированы данные радара EISCAT UHF в Тромсё. На рис. 3 (панель *a*) показано высотное распределение концентрации ионосферной плазмы N_e . До 12 UT 23 марта 2023 г. наблюдался рост N_e , вызванный электромагнитным излучением Солнца. Поэтому данный временной интервал не показан на рис. 3.

Сопоставление фазового индекса сцинтилляций с вариациями N_e показывает, что наибольший рост фазовых сцинтилляций (с 18 до 06 UT) происходит в период роста N_e в E-слое ионосферы (100–120 км) (см. рис. 3). На высоте 110 км величина N_e возрастала примерно с 1×10^5 до 5×10^5 см⁻³, а на высоте 152 км — с 0.5×10^5 до 3×10^5 см⁻³.

Также заметный рост фазовых сцинтилляций в вечернее время (18–20 UT) сопровождается ростом N_e в E-слое ионосферы. На высоте 110 км величина N_e возрастала с 1×10^5 до 8×10^5 см⁻³. Одним из основных механизмов формирования ионосферных неоднородностей является градиентно-дрейфовая неустойчивость. Для развития градиентно-дрейфовой неустойчивости необходим рост концентрации ионосферной плазмы [10, 22].

В период 12–15 UT 23 марта 2023 г. наблюдаются сильные возмущения в F-области ионосферы (на высоте 200–400 км) по данным радара EISCAT. Рост концентрации ионосферной плазмы N_e был более чем на порядок, с 1×10^5 до $> 1 \times 10^6$ см⁻³ на

высоте 282 км (см. рис. 3, панель б). По-видимому, данный рост концентрации в F-области ионосферы является проявлением “патчей” полярной шапки

(polar cap patches, PCPs) на авроральных широтах. Образование PCPs может быть вызвано непосредственным проникновением плазмы солнечного

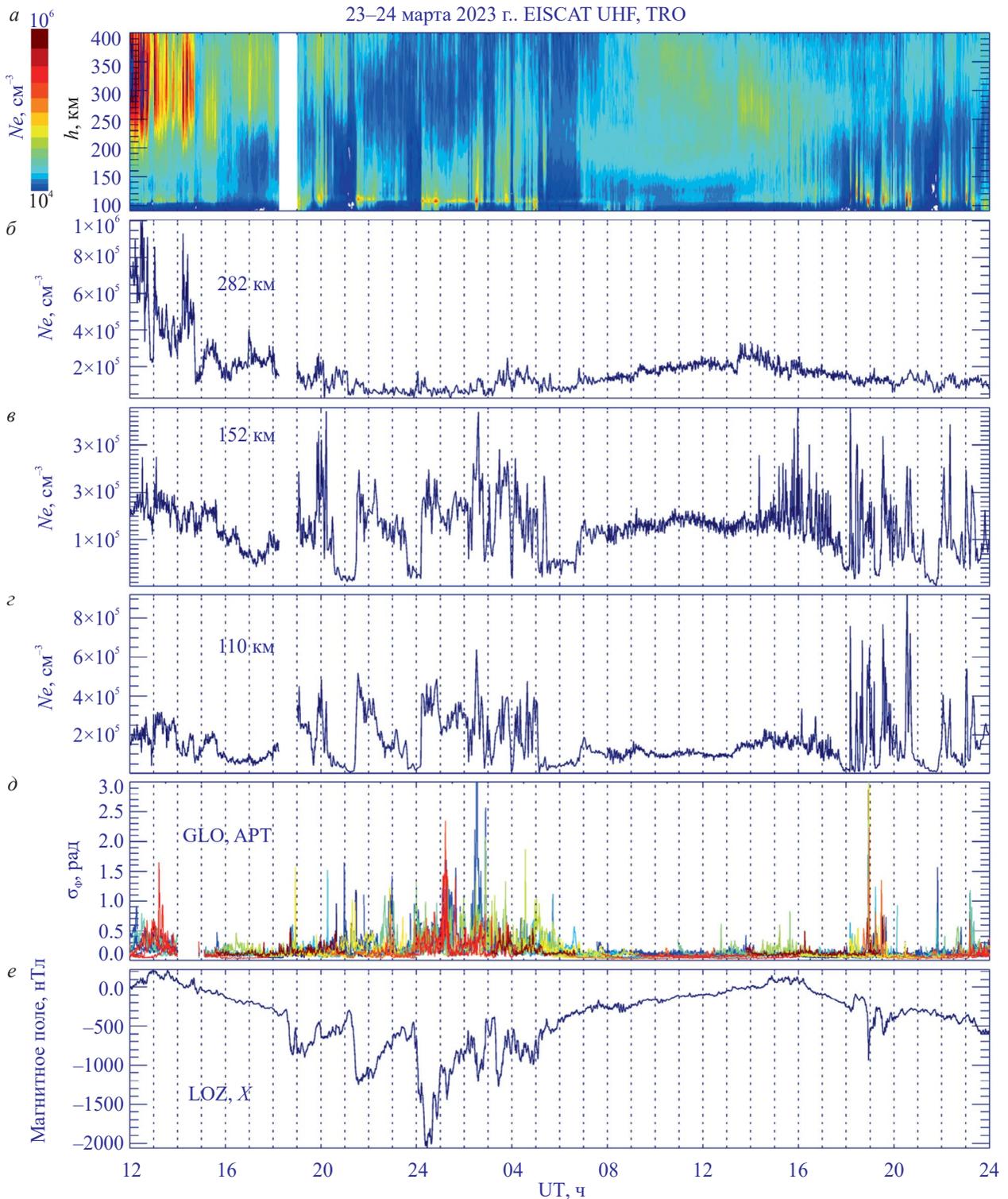


Рис. 3. Вариации концентрации ионосферной плазмы по данным радара EISCAT UHF в Тромсё с высотой; вариации концентрации ионосферной плазмы на высотах 110, 152, 282 км; фазовый индекс сцинтилляций для спутников ГЛОНАСС по данным приемника на станции АРТ (Апатиты).

ветра через полярную шапку в ионосферу Земли [11, 22]. В период сильной магнитной бури авроральный овал опустился на средние широты, полярная шапка расширилась. Вследствие этого удалось зарегистрировать такого рода возмущения в F-области по данным радара EISCAT на широте Тромсё. В это же время наблюдается небольшой рост концентрации N_e в E-области ионосферы (с 1×10^5 до 3×10^5 см⁻³ на высоте 110 км). Поэтому к росту фазовых сцинтилляций в данный

промежуток времени мог привести и незначительный рост концентрации в E-слое ионосферы.

На рис. 4 представлен суточный ход критических частот ионосферы по данным ионозонда на станции ГМС (гидрометеорологическая служба) “Ловозеро” (верхняя панель), ионограммы (две нижних панели). Здесь foEs — критическая частота Es-слоя ионосферы, foEsmin — минимальная критическая частота Es-слоя, foE — критическая частота E-слоя ионосферы, foEmin — минимальная критическая частота E-слоя, f0F2 — критическая частота F2-слоя,

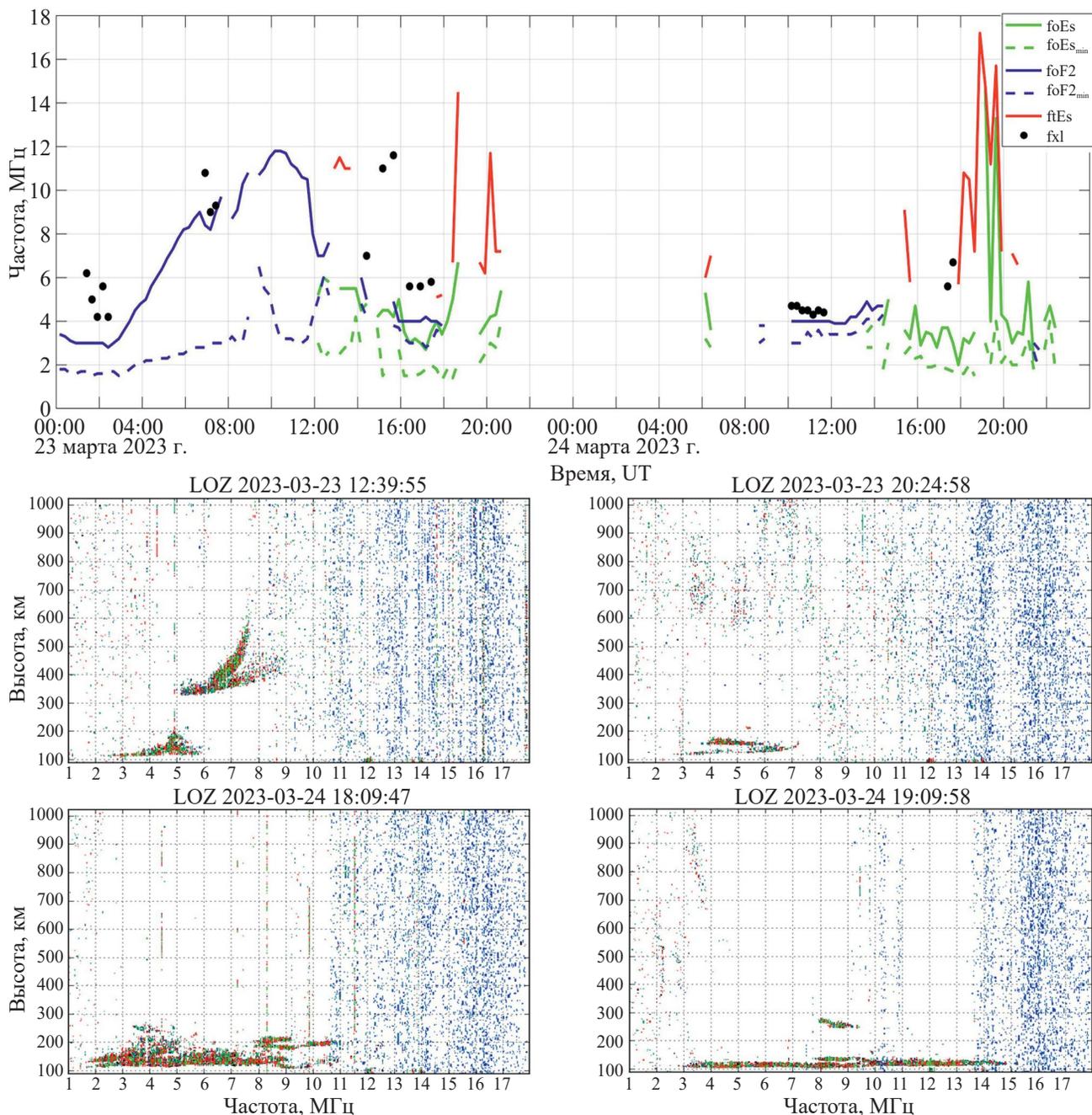


Рис. 4. Суточный ход критических частот ионосферы 23—24 марта 2023 г., ионограммы по данным ионозонда на станции ГМС “Ловозеро” в 12.39 UT, 20.24 UT — 23.03.2023, в 18.09 UT, 19.09 UT — 24.03.2023.

f_0F_2min — минимальная критическая частота F2-слоя, $ftEs$ — предельно отражаемая частота от Es.

По данным ионозонда у поселка Ловозера с 23 по 24 марта наблюдались сильно возмущенные ионосферные условия. До 12 UT 23 марта просматривался устойчивый ход критической частоты f_0F_2 . Однако минимально наблюдаемые частоты были более 2 МГц и возрастали по мере приближения к полудню, что говорит об увеличивающемся ионосферном поглощении.

После полудня на ионограммах регистрируется интенсивный спорадический Es-слой, с преобладающим рассеянием типа r . На ионограммах область Es имеет хорошо выраженный плоский нижний край с расслоениями и рассеянными отражениями над ним. Начиная с 18:30 тип рассеяния от Es-области меняется. На ионограммах преобладает рассеяние типа f , сопровождающееся увеличением критических частот f_0Es и $ftEs$, а также полной экранировкой слоя F2. Начиная с 21:30 UT и до 06 UT следующего дня следы отражений на ионограммах отсутствовали из-за поглощения сигнала ионозонда вследствие высокой ионизации. 24 марта до 18 UT наблюдались слабые периодические отражения от F2- и Es-областей ионосферы.

С 18 UT резко увеличивается интенсивность отражений от Es-слоя, на ионограммах видны следы от областей различной ионизации на высоте Es. Подобная структура ионограмм, как правило, наблюдается в период магнитных возмущений, сопровождаемых полярными сияниями.

Сопоставление результатов регистрации полярных сияний и данных о спорадической ионизации E-области показывает тесную связь между этими явлениями. Ионизация спорадического слоя E неоднородна, в ней могут формироваться области с ограниченными горизонтальными размерами, в которых плотность электронов больше, чем в окружающем слое. Максимальная частота отражений от этих неоднородностей определяет предельные частоты спорадических образований на ионограммах вертикального радиозондирования. Авторы работы [23] показали, что вариации максимумов и минимумов пиковых значений электронной плотности слоя Es, обнаруженные радаром некогерентного рассеяния, имеют хорошее согласие не с критической частотой, а с $ftEs$ — предельной частотой отражения от Es-слоя.

Наиболее мощные всплески σ_F сопровождаются появлением дискретных форм полярных

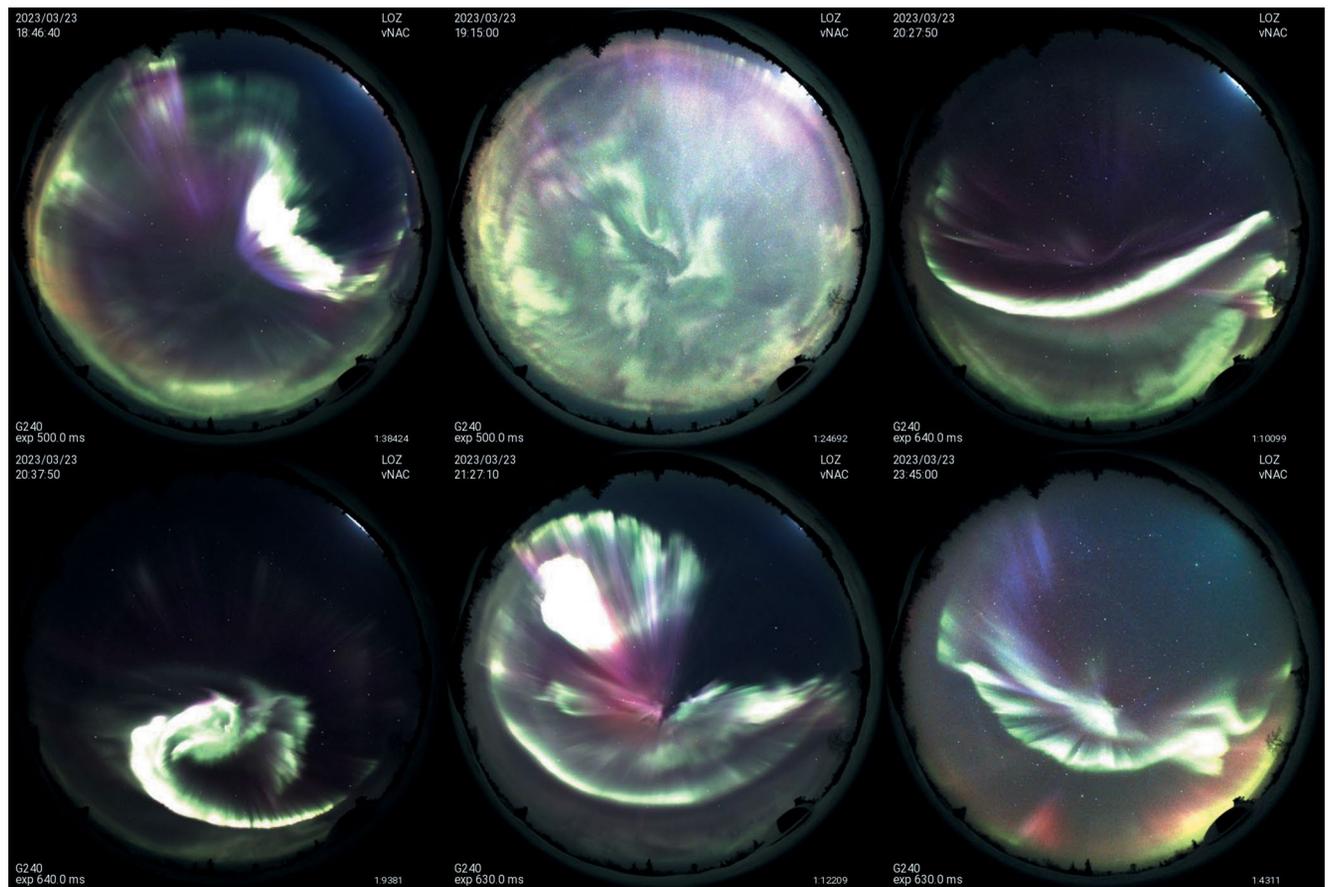


Рис. 5. Кадры камеры всего неба в обсерватории “Ловозеро” 23 марта 2023 г. для моментов времени 18.46, 19.15, 20.27 UT (верхняя панель), 20.37, 21.27, 23.45 UT (нижняя панель).

сияний (дуг, лучей) по данным камеры всего неба в обсерватории LOZ (рис. 5). Наблюдаются сияния не только в зеленой линии (557.7 нм), но и в красной линии (630.0 нм) выше 200 км. Преобладание зеленой линии в спектре полярных сияний говорит о вкладе возмущений в E-слое ионосферы в рост σ_F . Корреляция роста УНЧ-волн с ростом ионосферных сцинтилляций и с появлением дуг полярных сияний может говорить о важной роли УНЧ-волн, возбуждаемых за счет резонанса силовых линий (field line resonance, FLR) внутри магнитосферы, в высыпании заряженных частиц и формировании дуг полярных сияний [20, 21].

При этом пульсирующие полярные сияния, для которых характерна диффузная форма, не сопровождаются ростом σ_F (см. рис. 5, верхняя панель, средний рисунок, 19.15 UT). Считается, что пульсирующие полярные сияния вызваны высыпанием в атмосферу более энергичных электронов, релятивистских (субрелятивистских) энергий [24]. Таким образом, ионизация D-слоя ионосферы высокоэнергичными электронами не приводит к заметному росту сцинтилляций ГНСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнен анализ роста сцинтилляций сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. с использованием приемника Septentrio PolaRx5S, установленного в г. Апатиты (Мурманская область). Анализ показывает, что заметное увеличение фазовых сцинтилляций ($\sigma_F \approx 2$) на спутниках GPS и ГЛОНАСС происходит во время ночных и вечерних суббурь, а также во время дневных геомагнитных возмущений, связанных с положительной магнитной бурей. При этом более слабое геомагнитное возмущение приводит к сопоставимому и даже большему росту фазовых сцинтилляций. Увеличение амплитудных сцинтилляций GPS/ГЛОНАСС во время рассматриваемых событий не обнаружено.

Показана связь уровня фазовых сцинтилляций с ростом амплитуды УНЧ-волн. Наблюдается небольшое различие в уровне фазовых сцинтилляций по данным спутников ГЛОНАСС и GPS, что может быть связано с различными орбитами спутников и прохождением сигналов через локальные ионосферные возмущения.

Анализ данных радара EISCAT UHF показывает рост концентрации ионосферной плазмы в E-слое ионосферы (100–120 км), который происходит в период наибольшего роста фазовых сцинтилляций. Более заметный рост концентрации в F-слое ионосферы (более чем на порядок) привел к менее значительному росту фазовых сцинтилляций. Поэтому возмущения в E-слое ионосферы в большей степени приводят к формированию ионосферных

неоднородностей, ответственных за рост фазовых сцинтилляций ГЛОНАСС/GPS-сигналов.

Анализ критических частот ионосферы по данным ионозонда вертикального зондирования на станции ГМС “Ловозеро” говорит о формировании Es-слоя в период роста фазового индекса сцинтилляций.

Наибольший рост фазовых сцинтилляций сопровождается появлением дискретных форм полярных сияний (дуг, лучей). Пульсирующие полярные сияния, характеризующиеся диффузными формами, не приводят к заметному росту фазовых сцинтилляций.

Авторы выражают благодарность проектам EISCAT (<https://eiscat.se>), OMNI (cdaweb.gsfc.nasa.gov), IMAGE (<https://space.fmi.fi/image/www/index.php>) за возможность использования данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeh K.C., Liu C.H. // Proc. IEEE. 1982. V. 70. No. 4. P. 24.
2. Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64. No. 16. P. 1745.
3. Kintner P.M., Ledvina B.M., De Paula E.R. // Space Weather. 2007. V. 5. Art. No. S0900.
4. Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. // Space Weather. 2014. V. 12. No. 7. P. 508.
5. Черноус С.А., Шагимуратов И.И., Иевенко И.Б. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 5. С. 77; Chernous S.A., Shagimuratov I.I., Ievenko I.B. et al. // Russ. J. Phys. Chem. 2018. V. 12. No. 3. P. 562.
6. Черноус С.А., Швец М.В., Филатов М.В. и др. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 10. С. 33; Chernous S.A., Shvets M.V., Filatov M.V. et al. // Russ. J. Phys. Chem. 2015. V. 9. No. 5. P. 778.
7. Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 433; Shagimuratov I.I., Filatov M.V., Efishov I.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 318.
8. Smith A.M., Mitchell C.N., Watson R.J. et al. // Space Weather. 2008. V. 6. Art. No. s03d01.
9. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C. et al. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 1307.
10. Makarevich R.A., Crowley G., Azeem I. et al. // J. Geophys. Res. 2021. V. 126. Art. No. e2021JA029212.
11. Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W.J. // Ann. Geophys. 2021. V. 39. P. 687.
12. Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из косм. 2020. Т. 17. № 6. С. 139.
13. Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 428; Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch W. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 348.

14. Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Ясюкевич А.С. и др. // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из косм. 2017. Т. 14. № 1. С. 88.
15. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. // Косм. иссл. 2016. Т. 54. № 1. С. 23; Zakharov V.I., Yasyukevich Yu.V., Titova M.A. // Cosmic Res. 2016. V. 54. No. 1. P. 20.
16. Chernyshov A.A., Miloch W.J., Jin Y., Zakharov V.I. // Sci. Reports. 2020. V. 10. Art. No. 6363.
17. Russell C.T., McPherron R.L. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 92.
18. Mushini S.C., Jayachandran P.T., Langley R.B. et al. // GPS Solutions. 2012. V. 16. P. 363.
19. Forte B. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 1100.
20. Lyatsky W., Elphinstone R.D., Pao Q., Cogger L.L. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. No. A1. P. 263.
21. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н., Лоренцен Д. // Геомагн. и аэроном. 2016. Т. 56. № 1. С. 46; Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Samsonov S.N., Lorentzen D. // Geomagn. Aeronomy. 2016. V. 56. No. 1. P. 42.
22. Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D. et al. // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 8624.
23. Miller K.L., Smith L.G. // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. No. A8. P. 3761.
24. Miyoshi Y., Oyama S., Saito S. et al. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 2754.

Disturbances of GLONASS and GPS signals during magnetic storm on March 23—24, 2023, according to observations on the Kola peninsula

V. B. Belakhovsky^{1, *}, A. E. Vasilev², A. S. Kalishin³, A. V. Roldugin¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

²Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, 129128 Russia

³Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, 199397 Russia

*e-mail: belakhov@mail.ru

The growth of scintillations of GLONASS and GPS satellite signals using the Septentrio GNSS receiver installed in the city of Apatity during a strong magnetic storm on March 23—24, 2023, is analyzed. According to the ionosonde data at the Lovozero station and the data of the EISCAT radar in Tromsø, it was shown that the growth of phase scintillations is caused by an increase in the plasma concentration mainly in the E-layer of the ionosphere. The growth of phase scintillations is accompanied by the appearance of discrete forms of auroras.

Keywords: ionosphere, GLONASS, GPS, magnetic storm, EISCAT radar, auroras