DOI: 10.12737/szf-123202605
EDN: VQTMWN
УДК 550.385, 537.877

Поступила в редакцию 07.10.2025
Принята к публикации 16.02.2026

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДЛИННОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЕ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ, ВЫЗВАННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

VARIATIONS IN PARAMETERS OF LOW-FREQUENCY SIGNALS ON A MID-LATITUDE RADIO PATH DURING GEOMAGNETIC STORMS CAUSED BY HIGH-SPEED SOLAR WIND STREAMS FROM CORONAL HOLES

М.С. Соловьева
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, rozhnoi@ifz.ru

Г.М. Коркина
Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия, gkor@emsd.ru

Н.Р. Булатова
Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия, geofizik@emsd.ru

M.S. Solovieva
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia, rozhnoi@ifz.ru

G.M. Korkina
Kamchatka Branch, FRS Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, gkor@emsd.ru

N.R. Bulatova
Kamchatka Branch, FRS Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, geofizik@emsd.ru

Аннотация. Был выполнен анализ поведения амплитуды и фазы среднеширотного длинноволнового сигнала от JJY-передатчика (40 кГц) во время четырех геомагнитных бурь в 2021 и 2025 гг., которые были вызваны высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр, создающими коротирующую область взаимодействия. Анализ показал, что ночные аномальные возмущения амплитуды и фазы сигнала наблюдались в течение 3–5 дней во время магнитной бури. Амплитудные отрицательные аномалии сигнала составили от 4.5 до 21 дБ, фазовые — от 41° до 124°. Знак фазовых аномалий был различным в разные дни. Наблюдались как положительные, так и отрицательные фазовые аномалии, а также волнообразные возмущения с переходом от отрицательных к положительным аномалиям. Была найдена статистическая связь между величиной фазовой аномалии и интенсивностью геомагнитных возмущений. Коэффициент корреляции с *Dst*-индексом составил –0.39. Более значимой является связь между фазовыми аномалиями и *AE*-индексом, коэффициент корреляции в этом случае составил 0.53. Для амплитуды субионосферного сигнала не было найдено статистической связи между степенью геомагнитной активности и величиной аномалии.

Ключевые слова: субионосферные радиосигналы, нижняя ионосфера, геомагнитные бури, средние широты.

Abstract. Variations in the amplitude and phase of a mid-latitude low-frequency signal from the JJY (40 kHz) transmitter were analyzed during four geomagnetic storms in 2021 and 2025, which were caused by high-speed solar wind streams from coronal holes creating corotating interaction regions. The analysis has shown that nighttime anomalous disturbances in the amplitude and phase were observed for three days during a magnetic storm. The negative amplitude anomalies of the signal ranged from 4.5 to 21 dB; phase anomalies were from 41° to 124°. The sign of the phase anomalies was different on different days. We recorded both positive and negative phase anomalies, as well as wave-like disturbances with a transition from negative to positive anomalies. A statistical relationship was found between the value of the phase anomaly and the intensity of geomagnetic disturbances. The correlation coefficient with the *Dst* index was –0.39. The relationship between phase anomalies and the *AE* index is higher; the correlation coefficient in this case was 0.53. No statistical relationship was observed between geomagnetic activity and the anomaly for the sub-ionospheric signal amplitude.

Keywords: sub-ionospheric radio signals, lower ionosphere, geomagnetic storms, midlatitudes.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные бури вызываются различными типами течений солнечного ветра. Можно выделить бури, вызванные корональными выбросами массы (coronal mass ejection — CME), и бури, вызываемые коротирующими областями взаимодействия (coro-

© 2026. Соловьева М.С. и др.
Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY-NC-ND) License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

tating interaction regions — CIR). CIR образуются при взаимодействии быстрого потока солнечного ветра, исходящего из солнечных корональных дыр, с медленным потоком солнечного ветра [Burlaga, Lepping, 1977; Tsurutani et al., 1995, 2011; Gonzalez et al., 1999]. Из-за вращения Солнца образовавшиеся CIR проходят мимо Земли примерно каждые 27 дней, в результате чего часто наблюдаются рекуррентные магнитные бури, вызванные высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. В данной статье под геомагнитными бурями, вызванными CIR (далее — CIR-бури), понимаются бури, вызванные либо CIR, либо высокоскоростным потоком, либо и тем и другим одновременно.

Бури, вызванные CME (далее — CME-бури), происходят преимущественно во время солнечного максимума из-за частых выбросов плазмы из Солнца и часто бывают интенсивными и кратковременными. Напротив, CIR-бури чаще возникают на фазе спада солнечного цикла [Richardson et al., 2001] и, как правило, бывают умеренными (Dst>–100 нТл) и продолжительными. CIR-бури характеризуются длительной фазой восстановления, на которой наблюдается непрерывная геомагнитная AE-активность в авроральной зоне, вызванная альфвеновскими колебаниями в пределах самих потоков [Belcher, Davis 1971; Tsurutani, Gonzalez, 1987; Tsurutani et al., 2006]. CIR-бури, в отличие от CME-бурь, редко имеют внезапное начало. В работе [Borovsky, Denton, 2006] приведено 21 различие между геомагнитными CME-бурями и CIR-бурями.

Хотя CIR-бури слабее, чем сильные CME-бури, их кумулятивные эффекты в термосфере и ионосфере сопоставимы или даже сильнее (например, [Turner et al., 2009]). В связи с этим характеристики ионосферных возмущений, связанных с CIR-бурями, представляют особый интерес.

Изучению отклика F-области ионосферы во время геомагнитных бурь на основе измерения полного электронного содержания и сравнению эффектов, вызванных CIR- и CME-бурями, посвящена обширная литература [Suvorova et al, 2014; Matamba, Habarulema, 2018; Burešová et al., 2014; Qiu et al., 2015; Abaidoo et al, 2025; Dmitriev, 2018]. Менее определенными являются эффекты геомагнитных бурь в нижней ионосфере. Для исследования состояния нижней ионосферы в настоящее время используется метод анализа амплитудных и фазовых вариаций СДВ/ДВ (сверхдлинноволновых и длинноволновых) субионосферных сигналов от навигационных передатчиков в диапазоне частот 15–50 кГц. Волны в этом диапазоне распространяются внутри волновода земля–ионосфера и отражаются на высоте ~65 км днем и ~85 км ночью [Clilverd et al., 1999]. Такие сигналы, измеренные приемником, содержат информацию об области отражения ионосферы и ее изменчивости [Barr et al., 2000].

Belrose, Thomas [1968], исследуя характеристики сверхдлинноволновых, длинноволновых и дециметровых сигналов в Европе, обнаружили, что ночная амплитуда СДВ-сигнала во время магнитных бурь показывала небольшие изменения по сравнению с обычным поведением, тогда как в фазе сигнала наблюдались быстрые колебания. Kumar, Kumar [2014] нашли, что из семи геомагнитных бурь с Dst <–50 нТл только интенсивная буря с минимальным Dst=–145 нТл вызвала явное падение амплитуды СДВ-сигнала на низких широтах.

Возмущения амплитуды и фазы СДВ/ДВ-сигналов наблюдались на среднеширотных трассах во время экстремальных магнитных бурь 7 апреля 2000 г. и 31 октября 2003 г. [Peter et al., 2006], а также 17 марта 2015 г. [Mondala et al., 2021; Ряховский и др., 2021; Соловьева и др., 2025]. Аномальные вариации СДВ-сигналов на средних и низких широтах наблюдались также во время сильных и умеренных магнитных бурь [Клейменова и др., 2004; Choudhury et al., 2015; Tatsuta et al., 2015; Nwankwo et al., 2022; Kumar et al., 2023]. Однако при анализе умеренных геомагнитных бурь не рассматривались отдельно CME- и CIR-бури.

Исследования показывают, что эффекты, наблюдаемые в СДВ/ДВ-сигналах во время магнитных бурь, могут быть различными для сигналов с разными частотами, а также для трасс, проходящих в разных широтах, имеющих разную длину и ориентацию относительно магнитного поля. Данная работа посвящена анализу фазовых и амплитудных вариаций ДВ-сигнала (40 кГц) на среднеширотной радиотрассе в Дальневосточном регионе во время нескольких геомагнитных CIR-бурь. В предыдущей работе [Соловьева и др., 2025] на этой трассе рассматривались эффекты на главной фазе сильных и экстремальных геомагнитных CME-бурь в период 2000–2024 гг.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе были использованы данные непрерывного мониторинга среднеширотной радиотрассы Япония—Камчатка (2220 км, f=40 кГц). Передатчик JJY расположен в префектуре Фукусима (φ=37.37° N, λ=140.85° E), приемник — в Петропавловске-Камчатском (φ=53.15° N, λ=158.91° E). Приемник UltraMSK [http://ultramsk.com/] измеряет одновременно амплитуду (в дБ) и фазу (в градусах) с частотой оцифровки 96 кГц. Для анализа долговременных вариаций используются данные с последующим 20-секундным усреднением. Передатчик JJY транслирует сигналы точного времени и обеспечивает стабильную фазу сигнала.

Дневное распространение СДВ/ДВ-сигналов имеет устойчивый характер, тогда как их ночное распространение менее стабильно. Ночная ионосфера не только более изменчива, чем дневная, но и поддерживает большее количество мод в волноводе Земля–ионосфера, что приводит к более сложной модовой интерференции. В результате ночью амплитуды и фазы принимаемых сигналов становятся более чувствительными к ионосферным изменениям, чем днем [Thomson et al., 2007]. В связи с этим ДВ-сигнал анализировался в ночное время. Ночной интервал определялся по суточному ходу сигналов и не включал области терминаторов ввиду больших вариаций амплитуд и фаз сигналов в этих областях (рис. 1, вверху). Разностные значения характеристик сигнала вычислялись как разница между текущими и среднемесячными значениями (рис. 1, внизу).

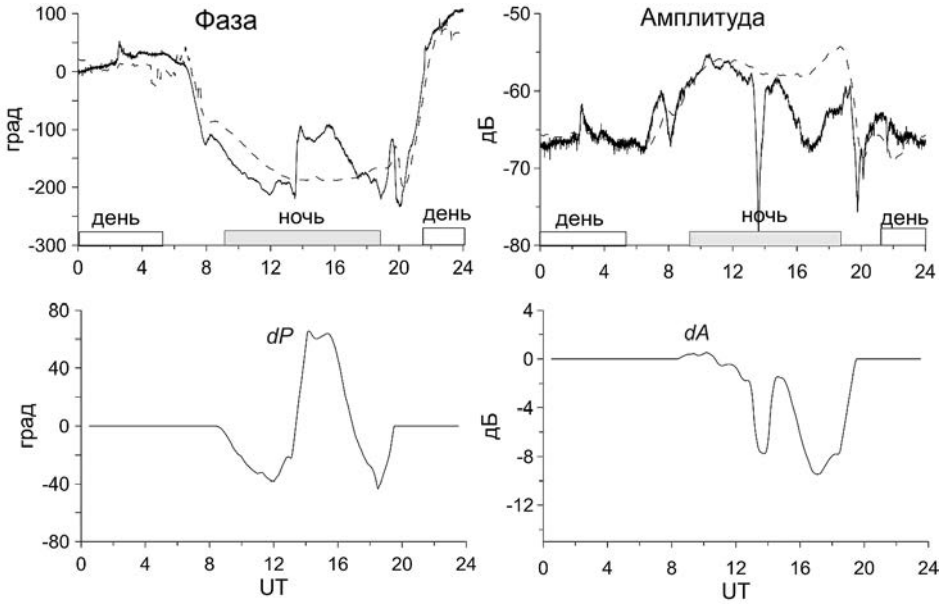


Рис. 1. Верхние панели — пример определения ночного и дневного интервалов для возмущенного дня 12 марта 2025 г.: штриховая линия — среднемесячные значения амплитуды (справа) и фазы (слева) ДВ-сигнала, сплошная линия — текущие значения. Нижние панели — разностные значения амплитуды (*dA*, справа) и фазы (*dP*, слева) сигнала в ночное время, сглаженные одночасовым скользящим окном

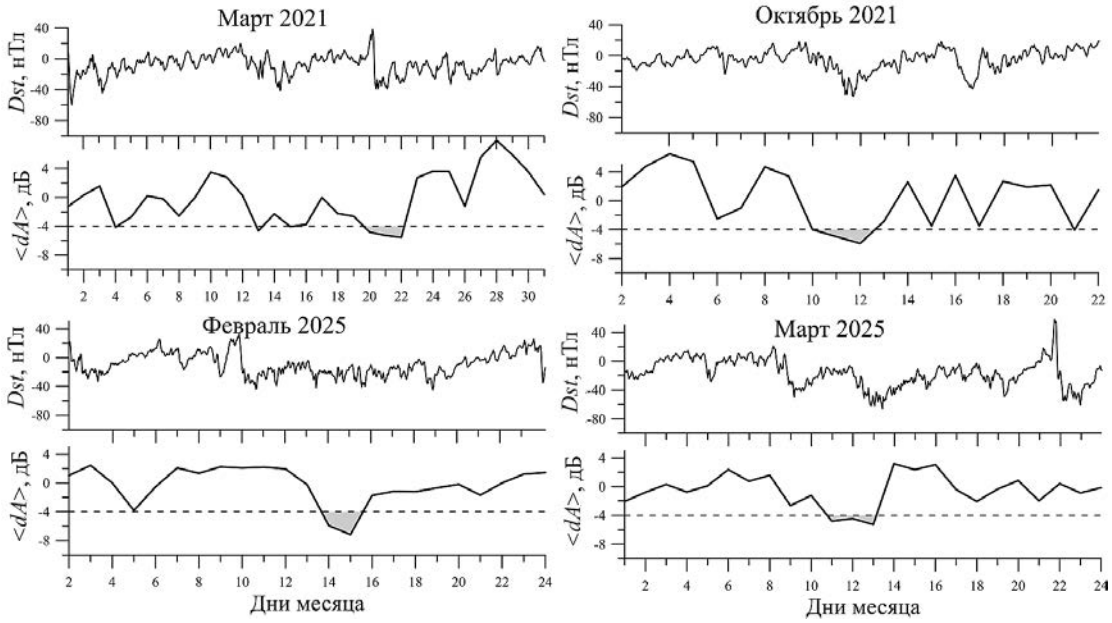


Рис. 2. Вариации *Dst*-индекса и усредненной за ночь разностной амплитуды (<*dA*>, дБ относительно 1 мкВ/м) сигнала JJY для четырех периодов анализа. Штриховая линия — уровень –2σ, закрашенные области показывают понижение ниже этого уровня; по оси X отложены дни месяца

Данные по изменениям *Dst*-индекса геомагнитной активности были получены с сайта WDC (World Data Center) Kyoto [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/]. Одночасовые значения скорости солнечного ветра и *AE*-индекса получены из базы OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]. Данные по потокам высокоэнергетичных электронов (пятиминутные) получены из базы геостационарного спутника GOES 16 [https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes16/l2/data/]. Информация о корональных дырах была получена с сайта STAR (Solar Terrestrial Activity Report) [http://www.solen.info/solar/old_reports/].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Анализ был выполнен для четырех геомагнитных бурь, вызванных скоростными потоками из корональных дыр: для двух бурь в периоды слабой солнечной активности 20–23 марта и 10–14 октября 2021 г. и для двух бурь на стадии спада солнечной активности 9–15 февраля и 9–13 марта 2025 г. Усредненное месячное число солнечных пятен составило: в марте 2021 г. — 21.7, в октябре 2021 г. — 45.2, в феврале 2025 г. — 154.6, в марте 2025 г. — 140.

На рис. 2 показаны графики *Dst*-индекса и усредненной за ночь разностной амплитуды сигнала JJY

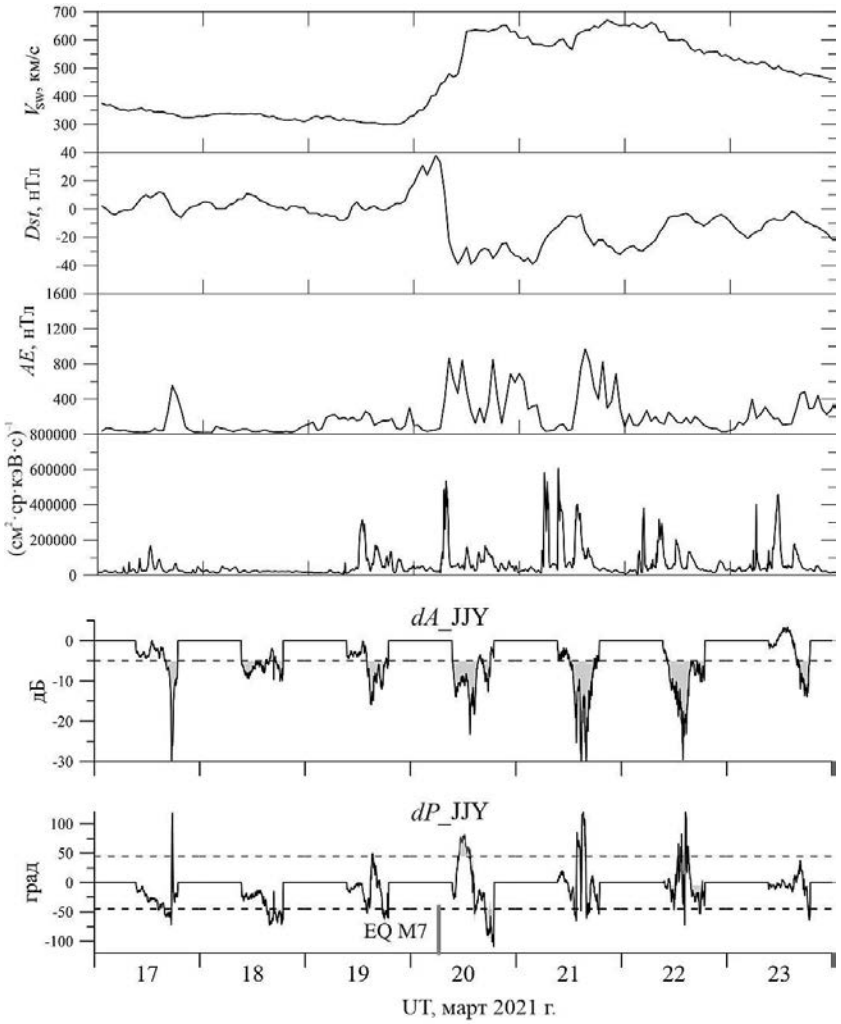


Рис. 3. Сверху вниз: скорость солнечного ветра, *Dst*- и *AE*-индексы магнитной активности, потоки высокоэнергетичных электронов на спутнике GOES (50–4000 кэВ), ночные разностные амплитуда (*dA*) и фаза (*dP*) сигнала JJY (с пятиминутным сглаживанием). Штриховая линия на графике амплитуды показывает уровень –2σ, на графике фазы — ±2σ. Закрашенные области показывают снижение ниже уровня –2σ и превышение уровня 2σ

для четырех анализируемых периодов. Штриховая линия на графике амплитуды показывает уровень –2σ. Видно, что во время CIR-бурь в течение трех дней наблюдается снижение амплитуды сигнала ниже уровня –2σ.

Рассмотрим подробнее бури, выбранные для анализа.

Геомагнитная буря 20–23 марта 2021 г.

Буря была вызвана высокоскоростным потоком, связанным с корональной дырой CH1000, которая пересекала центральный солнечный меридиан 17–19 марта.

На рис. 3 показаны вариации скорости солнечного ветра, *Dst*- и *AE*-индексов геомагнитной активности, потоков высокоэнергетичных электронов (по данным GOES) и ночных разностных амплитуды и фазы сигнала JJY с пятиминутным сглаживанием за период 17–23 марта 2021 г.

За день до начала бури 19 марта появляются потоки высокоэнергетичных электронов (около 280000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$) и наблюдается отрицательная аномалия амплитуды сигнала JJY. Отклонение амплитуды сглаженного одночасовым скользящим окном текущего сигнала от среднемесячного значения составило –13 дБ. Использовался метод, при котором вычисляется среднее значение для текущей точки и соседних с ней точек в заданном окне данных. Окно сдвигается на одно значение по временной шкале. Такое сглаживание было применено, чтобы убрать большие кратковременные выбросы (см. рис. 1).

Отклонение фазы от среднемесячного значения составило +40° в начале ночи и –56° в конце ночи. Следует отметить, что возмущения в сигнале JJY наблюдались также 17 и 18 марта, что может быть связано с подготовкой землетрясения M7 с эпицентром в зоне чувствительности трассы распространения субионосферного сигнала. Кроме этого, 17 марта появились потоки высокоэнергетичных электронов и *AE*-индекс возрос до ~550 нТл, что могло вызвать аномальные, хотя и кратковременные возмущения амплитуды и фазы сигнала JJY. 20 марта *Dst*-индекс опустился до –45 нТл, скорость солнечного ветра возросла примерно до 650 км/с, *AE*-индекс увеличился до 800 нТл, потоки высокоэнергетичных электронов — до 510000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$. Амплитудная

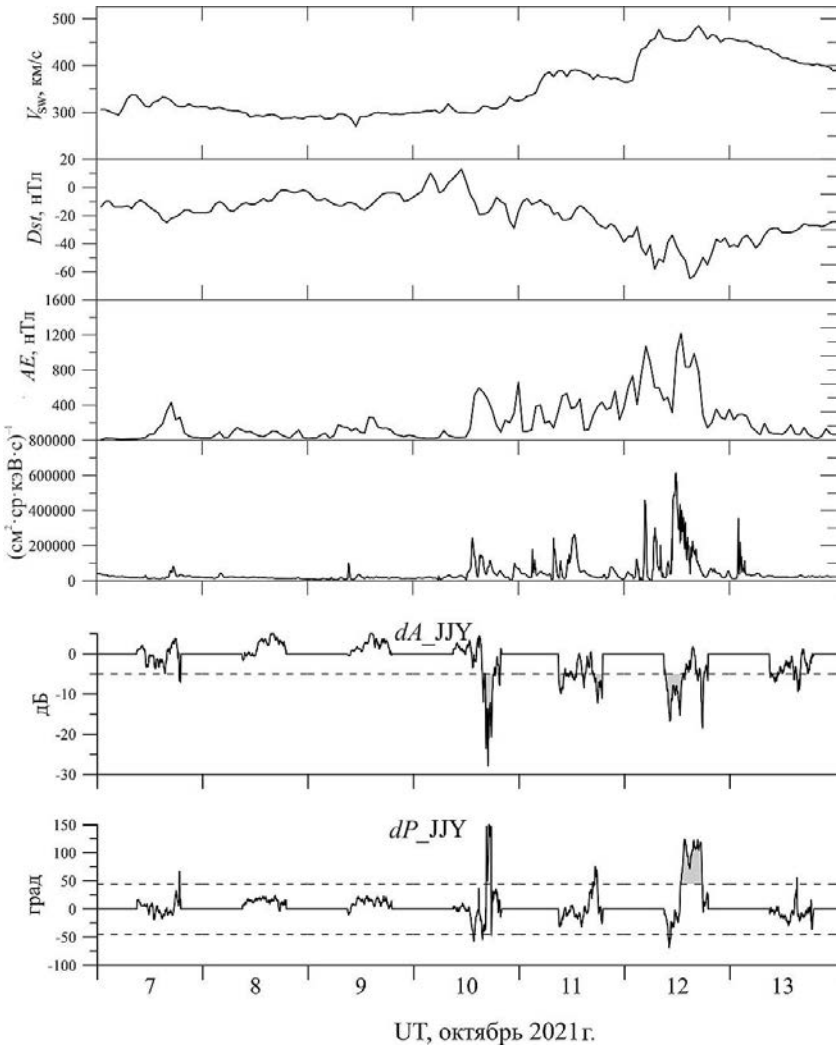


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для октября 2021 г.

аномалия в этот день составила –15 дБ. Возмущения фазы были разных знаков: +72° в начале ночи и –83° в конце. 21 марта *Dst*-индекс составил –33 нТл, *AE*-индекс возрос примерно до 900 нТл, потоки электронов — до 590000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$. Скорость солнечного ветра оставалась примерно такой же, как 20 марта. Отклонение сглаженной одночасовым окном амплитуды сигнала от среднемесячных значений составило –21 дБ, фазы — +98°/–47°. 22 и 23 марта минимальные значения *Dst*-индекса были около –20 нТл, *AE*-индекс значительно снизился, снизились также значения потоков электронов и скорости солнечного ветра. Амплитудная аномалия составила –21 дБ 22 марта и –12 дБ 23 марта, фазовая аномалия — +60° и –41° соответственно. Величины аномалий определялись по максимальному отклонению характеристик сигнала, сглаженных одночасовым скользящим окном, от среднемесячных значений.

Геомагнитная буря 10–14 октября 2021 г.

Буря была вызвана высокоскоростным потоком, связанным с корональной дырой CH1036, которая достигла центрального солнечного меридиана 9 октября.

Dst-индекс снизился к концу 10 октября до –29 нТл (рис. 4). В этот же день были зарегистрированы потоки высокоэнергетичных электронов порядка 230000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$, суббуревой *AE*-индекс составил 600 нТл. В амплитуде сигнала JJY в этот день наблюдалась отрицательная аномалия 17 дБ, в фазе — положительная аномалия 124. На следующий день продолжалось падение *Dst*-индекса, поток электронов и *AE*-индекс остались на уровне прошлого дня, скорость солнечного ветра увеличилась примерно до 400 км/с. Амплитудная аномалия составила –9 дБ, фазовая — +61°.

На следующий день 12 октября буря развивалась под действием как высокоскоростного потока из корональной дыры, так и межпланетной неоднородности, созданной выбросом корональной массы. *Dst* достиг минимальных значений –65 нТл, скорость солнечного ветра возросла почти до 500 км/с, *AE*-индекс — до 1200 нТл, потоки электронов — до ~600000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$. Амплитудная аномалия в этот день составила –14 дБ, фазовая — +112°.

Геомагнитная буря 9–15 февраля 2025 г.

Буря была вызвана скоростными потоками солнечного ветра, связанными с корональными дырами CH1269 и CH1270, которые пересекали центральный меридиан с 6 по 13 февраля.

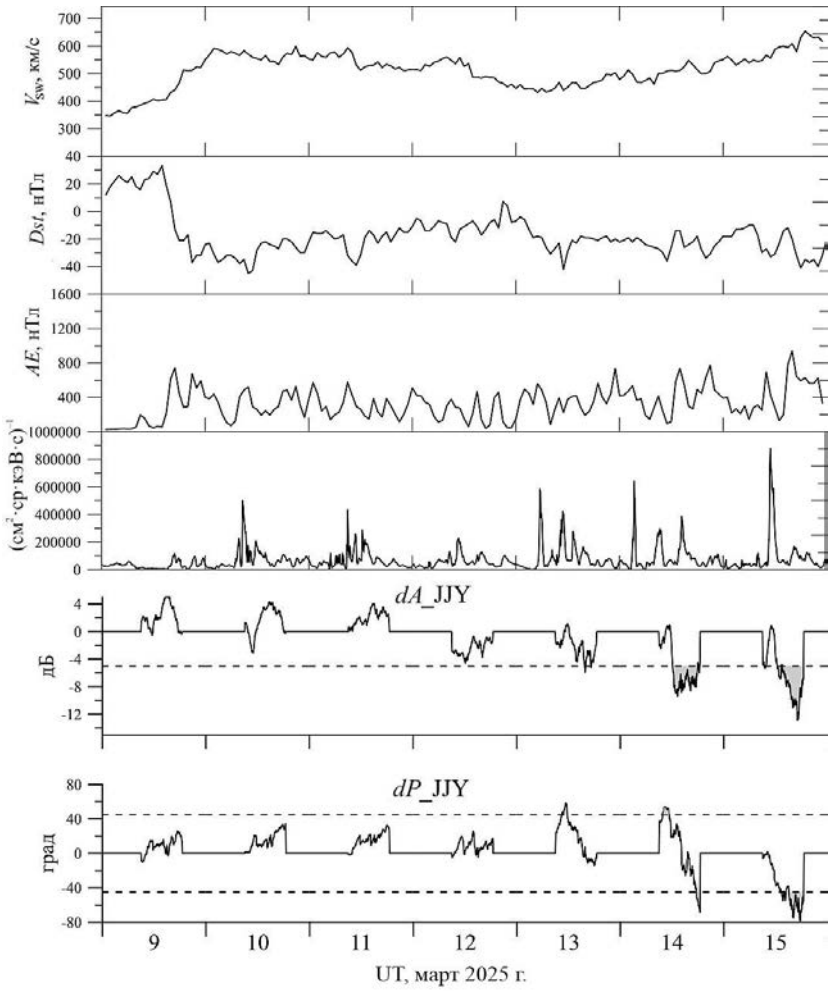


Рис. 5. То же, что на рис. 3, но для февраля 2025 г.

Девятого февраля *Dst*-индекс составил –37 нТл, *AE*-индекс увеличился до 700 нТл, скорость солнечного ветра возросла до 660 км/с, поток электронов был слабым (рис. 5). Сигнал JJY в этот день оставался невозмущенным. На следующий день *Dst*-индекс снизился до минимального значения –45 нТл, в последующие два дня поднялся до –22 нТл, значения *AE*-индекса и скорости солнечного ветра в течение этих трех дней оставались примерно на прежнем уровне, поток электронов составил 470000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$ 10 февраля и 230000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$ 12 февраля. В сигнале JJY в это время не наблюдалось никаких изменений.

Поток электронов начал возрастать 13 февраля и 15 февраля достиг 870000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$. В эти дни появились аномальные вариации ДВ-сигнала. Отклонение сглаженной одночасовым скользящим окном амплитуды составило –5 дБ 13 февраля, –9 дБ 14 февраля и –11 дБ 15 февраля. Фазовые отклонения составили 13 февраля +52°, 14 февраля наблюдались волнообразные возмущения фазы от +53° до –55°, 15 февраля — отрицательная аномалия 67°.

Геомагнитная буря 9–13 марта 2025 г.

Эта буря, как и предыдущая, связана с корональной дырой CH1270. Скорость солнечного ветра 9 марта достигла 650 км/ч, *Dst*-индекс снизился до –51 нТл, *AE*-индекс возрос до 980 нТл, потоки электронов достигли почти 1000000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$ (рис. 6). В этот день в амплитуде сигнала JJY наблюдалась отрицательная аномалия 9 дБ (в одночасовом окне сглаживания), в фазе — также отрицательная аномалия 63°.

Десятого марта значения *Dst*-индекса возросли, а значения *AE*-индекса и потоков электронов снизились. В этот день сигнал JJY оставался невозмущенным. Одиннадцатого марта в амплитуде сигнала наблюдалась отрицательная аномалия 6 дБ, возмущения фазы находились в пределах стандартного отклонения; 12 марта *Dst*-индекс составил –62 нТл, *AE*-индекс — ~1000 нТл, потоки электронов — ~800000 (см^2 ср кэВ с)$^{-1}$, скорость солнечного ветра — ~510 км/с. Примерно такие же значения были зарегистрированы и на следующий день. Амплитудная аномалия составила –10 дБ 12 марта и –12 дБ 13 марта, фазовая — +63° и –70° соответственно.

На рис. 7 показана зависимость амплитудных и фазовых аномалий сигнала JJY для 15 возмущенных дней во время четырех бурь (см. таблицу) от минимального за день *Dst*-индекса и максимального за день *AE*-индекса. Поскольку фазовые аномалии были переменных знаков, использовались максимальные абсолютные значения. Статистической связи между *Dst*-индексом и величиной амплитудной аномалии сигнала найдено не было. Коэффициент корре-

Максимальные отклонения амплитуды и фазы
сглаженного одночасовым скользящим окном сигнала JJY
от среднемесячных значений

Дата	max *AE*, нТл	min *Dst*, нТл	Δ*A*, дБ	Δ*P*, град.
20.03.2021	800	–45	–15	72/–83
21.03.2021	910	–33	–21	98/–47
22.03.2021	130	–24	–21	60
23.03.2021	430	–19	–12	–41
10.10.2021	600	–29	–17	124
11.10.2021	500	–33	–9	61
12.10.2021	1200	–65	–14	112
13.02.2025	450	–42	–5	52
14.02.2025	700	–36	–9	53/–55
15.02.2025	870	–41	–11	–67
09.03.2025	980	–42	–9	–63
10.03.2025	400	–28	–4.5	–41
11.03.2025	430	–19	–6	26
12.03.2025	1000	–62	–10	63
13.03.2025	850	–66	–12	–70

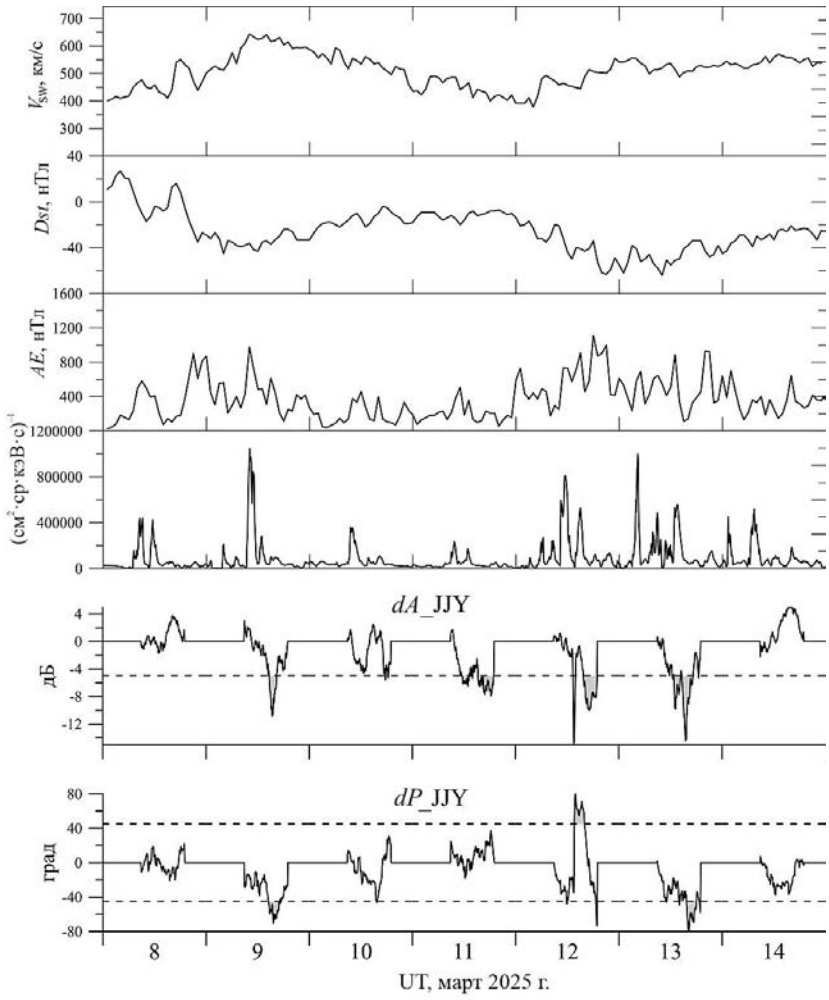


Рис. 6. То же, что рис. 3, но для марта 2025 г.

ляции был близок к нулю. Коэффициент корреляции фазовых аномалий с *Dst*-индексом составил –0.39. Фаза сигнала оказалась более чувствительна к величине *AE*-индекса: коэффициент корреляции 0.53, тогда как для амплитуды коэффициент корреляции с *AE*-индексом составил только –0.13.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализировалось поведение амплитуды и фазы сигнала JJY (40 кГц) на среднеширотной трассе распространения во время четырех геомагнитных бурь, вызванных CIR. Если сравнивать полученные резуль-

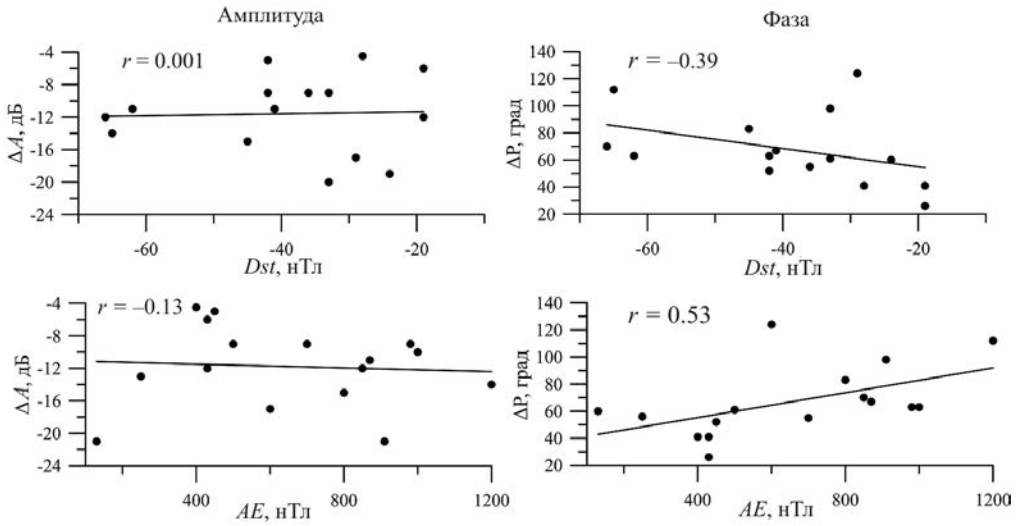


Рис. 7. Графики зависимости амплитудных (слева) и абсолютных по величине фазовых (справа) аномалий от минимального за день *Dst*-индекса (вверху) и максимального за день *AE*-индекса (внизу), *r* — коэффициент корреляции

таты с результатами, полученными для сильных СМЕ-бурь [Соловьева и др., 2025], можно отметить следующие особенности.

Аномальные возмущения амплитуды и фазы во время рассмотренных CIR-бурь наблюдались в течение 3–5 дней, тогда как в периоды сильных и экстремальных геомагнитных СМЕ-бурь возмущения наблюдались только один день, за исключением бури 17 марта 2015 г.

Эффекты в СДВ/ДВ-сигналах на средне- и низкоширотных радиотрассах были найдены только для тех сильных и экстремальных СМЕ-бурь, для которых внезапное начало и главная фаза приходились на местную ночь. Эффекты наблюдались в 7 из 12 случаев (58 %) для низкоширотных трасс [Kumar et al., 2023] и в 16 из 20 случаев (80 %) для среднеширотных трасс распространения сигнала JJY. CIR-бури, рассмотренные в данной работе, не имеют внезапного начала, и время суток не влияет на появление или отсутствие эффектов.

Несмотря на то, что CIR-бури значительно слабее СМЕ-бурь, их воздействие на характеристики сигнала JJY оказалось несколько сильнее, чем воздействие СМЕ-бурь. Средняя величина амплитудной аномалии сигнала JJY во время CIR-бурь, рассчитанная по 15 возмущенным дням (см. таблицу), составила –11.3 дБ, аномальное отклонение амплитуды сигнала JJY от среднемесячных значений во время сильных и экстремальных СМЕ-бурь (16 событий) было –9.5 дБ [Соловьева и др., 2025]. Для фазы сигнала средние абсолютные величины аномалии составили 67° для CIR-бурь и 57° для СМЕ-бурь.

Как в случае сильных СМЕ-бурь (16 возмущенных дней), так и в случае магнитных CIR-бурь (15 возмущенных дней) не было найдено статистической связи между уровнем геомагнитной активности и величиной аномалии амплитуды сигнала JJY. Фаза оказалась более чувствительна. Коэффициент корреляции между *Dst*-индексом и абсолютной величиной фазовых аномалий составил 0.25 в случае СМЕ-бурь и –0.39 в случае CIR-бурь. Для CIR-бурь была найдена статистическая связь между аномалиями сигнала JJY и *AE*-индексом. Коэффициент корреляции для амплитуды составил –0.13, для фазы — 0.53. В случае сильных СМЕ-бурь корреляции с *AE*-индексом нет ни для амплитуды, ни для фазы сигнала JJY: для обеих характеристик коэффициент корреляции был около 0.05.

Фазовые аномалии сигнала JJY в случае сильных и экстремальных СМЕ-бурь всегда были отрицательными, за исключением бури 17 марта 2015 г. (так называемые бури в день св. Патрика), когда фазовые аномалии имели разный знак. Семнадцатого марта наблюдались отрицательная аномалия 52° в начале ночи и положительная аномалия 108° в конце ночи. В следующие два дня аномалии были положительные (121° и 70°), 20 марта наблюдалась отрицательная аномалия 58°. В случае CIR-бурь фазовые аномалии сигнала JJY имели разные знаки. Из 15 возмущенных дней для трех наблюдались волновые аномалии фазы, когда знак менялся с плюса на минус, для шести аномалии были положительными, для пяти — отрицательными. В одном случае отклонение сглаженного одночасовым скользящим окном значения фазы не превышало уровень 2σ, в то время как в амплитуде наблюдалось аномальное отклонение от средних значений.

ВЫВОДЫ

Анализ особенностей субионосферного распространения длинноволновых сигналов в средних широтах во время четырех геомагнитных бурь, вызванных CIR, показал, что аномальные возмущения амплитуды и фазы сигнала продолжались в течение 3–5 дней.

Отрицательные амплитудные аномалии сигнала составили от 4.5 до 21 дБ, фазовые — от 41° до 124°. Знак фазовых аномалий был различным в разные дни. Наблюдались как положительные, так и отрицательные фазовые аномалии, а также волнообразные возмущения фазы с переходом от положитель-

ных значений к отрицательным. Была найдена слабая статистическая связь между величиной фазовой аномалии сигнала и интенсивностью геомагнитных возмущений. Коэффициент корреляции с *Dst*-индексом составил 0.39. Более значимой является зависимость фазовых аномалий от *AE*-индекса с коэффициентом корреляции 0.53. Для амплитуды ДВ-сигнала не было найдено связи между степенью геомагнитной активности и величиной аномалии.

В работе использовались данные, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» [http://www.gsras.ru/unu], развернутой при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00604-25.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, которые значительно улучшили статью.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Рожной А.А., Соловьева М.С. Вариации параметров СДВ-сигналов на радиотрассе Австралия—Камчатка во время магнитных бурь. *Геомагнетизм и* аэрономия. 2004, т. 44, № 3, с. 385–393.

Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В. и др. Исследования состояния и динамики ионосферы по данным синхронной регистрации радиосигналов КНЧ/ОНЧ- и ВЧ/УВЧ-диапазонах в геофизической обсерватории «Михнево». *Физика Земли*. 2021, № 5, с. 155–168. https://doi.org/10.31857/S0002333721050173.

Соловьева М.С., Коркина Г.М., Булатова Н.Р., Касимова В.А. Возмущения параметров среднеширотных субионосферных сигналов во время сильных и экстремальных геомагнитных бурь. *Сборник тезисов докладов XIV международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений»*, 29 сентября – 3 октября 2025 г., с. Паратунка, Камчатский край, ИКИР ДВО РАН, 2025, с. 56. URL: https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/Events/Conferences/2025-XIV/abstracts2025.pdf (дата обращения 30 января 2026 г.).

Abaidoo S., Klausner V., Candido C.M.N., et al. CIR-driven geomagnetic storm and high-intensity long-duration continuous *AE* activity (HILDCAA) event: Effects on Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere—observations and modeling. *Atmosphere*. 2025, vol. 16, iss. 5, 499. https://doi.org/10.3390/atmos16050499.

Barr R., Llanwyn D.J., Rodger C.J. ELF and VLF radio waves. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, iss. 17-18, pp. 1689–1718. https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00121-8.

Belcher J.W., Davis L., Jr. Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, 2. *J. Geophys. Res*. 1971, vol. 76, iss. 16, pp. 3534–3563. https://doi.org/10.1029/JA076i016p03534.

Belrose J.S., Thomas L. Ionization changes in the middle latitude D-region associated with geomagnetic storms. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1968, vol. 30, iss. 7, pp. 1397–1413. https://doi.org/10.1016/S0021-9169(68)91260-9.

Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res*. 2006, vol. 111, A07S08. https://doi.org/10.1029/2005JA011447.

Burešová D., Laštovička J., Hejda P., Bochnicek J. Ionospheric disturbances under low solar activity conditions. *Adv. Space Res*. 2014, vol. 54, iss. 2, pp. 185–196. https://doi.org/10.101/j.asr.2014.04.007.

Burlaga L.F., Lepping R.P. The causes of recurrent geomagnetic storms. *Planet. Space Sci*. 1977, vol. 25, iss. 12, pp. 1151–1160. https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90090-3.

Choudhury A., De B.K., Guha A., Roy R. Long-duration geomagnetic storm effects on the D region of the ionosphere: Some case studies using VLF signal. *J. Geophys. Res*. 2015, vol. 120, iss. 1, pp. 778–787. https://doi.org/10.1002/2014JA020738.

Clilverd M.A., Thomson N.R., Rodger C.J. Sunrise effects on VLF signals propagating over a long north-south path. *Radio Sci*. 1999, vol. 34, pp. 939–948. https://doi.org/10.1029/1999RS900052.

Dmitriev A. Spatial characteristics of recurrent ionospheric storms at low latitudes during solar minimum. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2018, vol. 179, pp. 553–561. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.013.

Gonzalez W.D. Tsurutani B., Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev*. 1999, vol. 88, pp. 529–562. https://doi.org/10.1023/A:1005160129098.

Kumar A., Kumar S. Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum. *Earth Planet. Space*. 2014, vol. 66, 76. https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-76.

Kumar Sa., Kumar Su., Singh R. Geomagnetic storm associated D-region anomalies estimated from VLF observations at a low-latitude station, Suva, Fiji. *J. Geophys. Res*. 2023, vol. 128, iss. 10, e2022JA031253. https://doi.org/10.1029/2022JA031253.

Matamba T.M., Habarulema J.B. Ionospheric responses to CME- and CIR-driven geomagnetic storms along 30°–40° E over the African sector from 2001 to 2015. *Space Weather*. 2018, vol. 16, iss. 5, pp. 538–556. https://doi.org/10.1029/2017SW001754.

Mondala S.K., Palb S., Sena A., et al. Long-lasting disturbances in the mid-latitude sub-ionospheric VLF radio signals due to the super geomagnetic storm of 17 March 2015. *Adv. Space Res*. 2021, vol. 68, iss. 6, pp. 2295–2308. https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.044.

Nwankwo V.U.J., Denig W., Chakrabarti S.K., et al. Diagnostic study of geomagnetic storm-induced ionospheric changes over very low-frequency signal propagation paths in the mid-latitude D region. *Ann. Geophys.* 2022, vol. 40, pp. 433–461. https://doi.org/10.5194/angeo-40-433-2022.

Peter W.B., Chevalier M.W., Inan U.S. Perturbations of mid-latitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A03301. https://doi.org/10.1029/2005JA011346.

Qiu N., Yan-Hong C., Wen-Bin W., et al. Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in mid-latitude regions. *Chinese J. Geophys*. 2015, vol. 58, iss. 7, pp. 2250–2262. https://doi.org/10.6038/cjg20150704.

Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, iss. 13, pp. 2569–2572. https://doi.org/10.1029/2001GL013052.

Suvorova A.V., Huang C.-M., Matsumoto H., et al. Low-latitude ionospheric effects of energetic electrons during a recurrent magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, iss. 11, pp. 9283–9302. https://doi.org/10.1002/2014JA020349.

Tatsuta K., Hobara Y., Pal S., Balikhin M. Sub-ionospheric VLF signal anomaly due to geomagnetic storms: a statistical study. *Ann. Geophys.* 2015, vol. 33, pp. 1457–1467. https://doi.org/10.5194/angeo-33-1457-2015.

Thomson N.R., Clilverd M.A., McRae W.M. Nighttime ionospheric D region parameters from VLF phase and amplitude. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A07304. https://doi.org/10.1029/2007JA012271.

Tsurutani B., Gonzalez W.D. The cause of high-intensity long-duration continuous *AE* activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains. *Planetary Space Sci.* 1987, vol. 3, iss. 4, pp. 405–412. https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90097-3.

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, iss. A11, pp. 21717–21733. https://doi.org/10.1029/95JA01476.

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A07S01. https://doi.org/10.1029/2005JA011273.

Tsurutani B.T., Echer E., Guarnieri F.L., Gonzalez W.D. The properties of two solar wind high speed streams and related geomagnetic activity during the declining phase of solar cycle 23. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2011, vol. 73, pp. 164–177. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.04.003.

Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A. Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2009, vol. 71, iss. 10–11, pp. 1023–1031. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.02.005.

URL: http://ultramsk.com/ (дата обращения 30 января 2026 г.).

URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/ (дата обращения 30 января 2026 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html (дата обращения 10 сентября 2025 г.).

URL: http://www.solen.info/solar/old_reports/ (дата обращения 30 января 2026 г.).

URL: https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes16/l2/data/ (дата обращения 10 сентября 2025 г.).

URL: http://www.gsras.ru/unu (дата обращения 30 января 2026 г.).

Как цитировать эту статью:

Соловьева М.С., Коркина Г.М., Булатова Н.Р. Вариации параметров длинноволновых сигналов на среднеширотной радиотрассе во время геомагнитных бурь, вызванных высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 3, с. 51–60. https://doi.org/10.12737/szf-123202605.