

УДК 550.385.4

ЭФФЕКТ ПРЕРЫВАНИЯ “СЕРПЕНТИННОЙ ЭМИССИИ” (*SE*) В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ НАЧАЛ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ (*SSC*)

© 2022 г. Н. А. Куражковская¹, *, Б. И. Клайн¹, **¹Геофизическая обсерватория Борок филиал Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН (ГО Борок ИФЗ РАН), пос. Борок (Ярославская обл.), Россия

*e-mail: knady@borok.yar.ru

**e-mail: klain@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Проведено исследование поведения несущей частоты электромагнитного излучения в диапазоне (0.1–5 Гц) типа “серпентинной эмиссии” (Serpentine Emission – *SE*), наблюдаемой в области полярной шапки во время внезапных начал геомагнитных бурь (Sudden Storm Commencement – *SSC*). Для анализа использованы уникальные аналоговые магнитные записи Антарктической обсерватории Восток (исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = -85.41^\circ$, $\Lambda' = 69.01^\circ$), оцифрованные с высокой частотой (20 Гц) и находящиеся в свободном доступе на сайте Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике, Москва. Обнаружено, что в момент *SSC* в обл. Восток наблюдалось шумовое широкополосное электромагнитное излучение в диапазоне Pc1–2 с резким передним фронтом, которое приводило к нарушению режима генерации “серпентинной эмиссии”. Нарушение возбуждения *SE* проявлялось в прерывании несущей частоты излучения с последующим возобновлением. В работе исследовано 92 случая наблюдений *SSC*, к которым имелись данные регистрации *SE*. Эффект прерывания *SE* во время *SSC* отмечался в более чем 80% случаев независимо от того, развивалась или нет впоследствии геомагнитная буря и от ее интенсивности. Непрерывно продолжающаяся часами и даже сутками “серпентинная эмиссия” во время *SSC* в доминирующем числе случаев прерывалась примерно на 2–3 ч, что существенно меньше средней длительности главной фазы и продолжительности самой бури. Показано, что несущая частота *SE* плавно снижалась примерно за 2 ч до момента *SSC*. Предполагается, что межпланетное возмущение, следующее за фронтом ударной волны, возбуждает широкополосное шумовое излучение в полярной шапке, которое нарушает режим генерации *SE*.

DOI: 10.31857/S0016794022040101

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультранизкочастотное (УНЧ) электромагнитное излучение с глубокой модуляцией несущей частоты в диапазоне Pc1–2 (0.1–5 Гц), названное “серпентинной эмиссией” (Serpentine Emission – *SE*), имеет почти полувековую историю исследований, начиная с пионерских работ [Гульельми и Довбня, 1973, 1974; Гульельми и др., 1975]. Динамический спектр этого излучения представляет собой непрерывно извивающуюся полосу шириной ~ 0.1 Гц, напоминающую ползущую змею, что и привело авторов [Гульельми и Довбня, 1973] присвоить ему такое название.

Первоначально *SE* была обнаружена по данным наблюдений магнитного поля в обсерватории Восток, расположенной вблизи южного геомагнитного полюса (Антарктида). В дальнейшем аналогичное излучение было зарегистрировано

на других высокоширотных обсерваториях Арктики и Антарктики [Asheim, 1983; Morris and Cole, 1987].

Главной морфологической закономерностью *SE* является глубокая модуляция несущей частоты с квазипериодом от 1 до 60 мин. Примеры наблюдения *SE* с различными периодами модуляции несущей частоты приведены, например, в работе [Довбня и Потапов, 2018]. Другая характерная особенность *SE* – перманентность. Непрерывная продолжительность наблюдения *SE* может составлять от нескольких часов до нескольких суток. “Серпентинная эмиссия” наблюдается преимущественно в условиях спокойной или умеренно-возмущенной магнитосферы ($Kp \sim 0-3$) [Довбня и Потапов, 2018].

В одной из первых работ [Гульельми и Довбня, 1973] по исследованию свойств “серпентинной

емиссии” в области полярной шапки было выдвинуто предположение о возбуждении *SE* в межпланетной среде в результате циклотронной неустойчивости. Обнаружение корреляции несущей частоты *SE* с вариацией косинуса угла ψ между векторами скорости плазмы и межпланетного магнитного поля (ММП) косвенно подтвердило внемагнитосферное происхождение этого вида геомагнитных пульсаций [Гульельми и Довбня, 1974; Гульельми и др., 1975]. Другим косвенным подтверждением внемагнитосферного происхождения *SE* явилось обнаружение в спектре частотной модуляции “серпентинной эмиссии” колебаний с периодом ~ 5 мин [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015; Довбня и др., 2017], который формально совпадал с 5-минутными колебаниями фотосферы Солнца [Прист, 1985]. Авторы работ [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015] полагают, что обнаруженная 5-минутная модуляция *SE* может быть генетически связана с 5-минутными колебаниями поверхности Солнца. В настоящее время, учитывая экспериментальные закономерности *SE* (перманентность наблюдения, характерный диапазон частот, глубокая модуляция несущей частоты) и теоретические обоснования, предполагается, что данное излучение самовозбуждается в результате ионно-циклотронной неустойчивости плазмы, а ее частота модулируется волнами Альвена, исходящими от Солнца [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015].

Следует отметить, что многие аспекты морфологических закономерностей *SE* продолжают оставаться малоизученными. Например, связь “серпентинной эмиссии” с другими геофизическими процессами практически не исследовалась, за исключением работы [Довбня и др., 1994], в которой анализировалась динамика периода модуляции *SE* перед мощными протонными вспышками на Солнце. По данным регистрации УНЧ-колебаний в диапазоне 0.01–1.5 Гц в южной полярной шапке было показано, что квазипериод модуляции несущей частоты *SE* возрастает в среднем от 30 до 60 мин примерно за сутки перед вспышками на Солнце и достигает своего максимума в среднем через 5–10 ч после вспышки. При этом было обращено внимание на тот факт, что к моменту внезапного начала геомагнитных бурь излучение прекращалось.

Известно, что импульсы SSC являются следствием взаимодействия межпланетных ударных волн с магнитосферной Земли [Araki, 1994]. SSC приводят к возбуждению магнитогидродинамических волн (МГД-волн) в широком диапазоне частот как на средних и низких широтах, так и в полярных областях магнитосферы, например, [Saito and Matsushita, 1967; Shumilov et al., 1996; Куражковская и др., 1996; Клейменова и др., 1999; Kerttula et al., 2001]. В связи с вышесказанным, неожиданным является факт прекращения “сер-

пентинной эмиссии” во время наблюдения SSC. Поскольку исследование в то время выполнялось на ограниченном материале (имелись данные спектрального анализа электромагнитного излучения только за интервалы времени, предшествующие шести событиям протонных вспышек на Солнце), не было возможности исследовать поведение “серпентинной эмиссии” во время других случаев наблюдения SSC. Из вышесказанного следует, что изучение воздействия внезапных начал магнитных бурь на генерацию “серпентинной эмиссии”, несомненно, представляет интерес и требует дальнейшего исследования.

В 2020 г. в свободном доступе появились уникальные данные аналоговой регистрации короткопериодных вариаций геомагнитного поля, полученные на высокочувствительных индукционных магнитометрах советскими Антарктическими экспедициями на станции Восток за период 1966–1973 гг. и оцифрованные с высокой частотой (20 Гц) [Пилипенко и др., 2020]. Это значительно расширило возможности для дальнейшего исследования закономерностей “серпентинной эмиссии”.

Целью данной работы является исследование влияния внезапных начал магнитных бурь на возбуждение “серпентинной эмиссии”.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования были использованы оцифрованные аналоговые магнитные записи в формате WAV Антарктической обсерватории Восток (исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = -85.41^\circ$, $\Lambda' = 69.01^\circ$) за период 1966 (ноябрь, декабрь), 1968 (март–июль), 1970–1972, 1973 (январь–март) гг. из Мирового Центра Данных (МЦД) по Солнечно-Земной Физике (Москва) (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/antarctic_magn_4.ru.html). Информация о времени наблюдения импульсов SSC получена также из МЦД (<http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com/ssc.dat>). Данные графического представления *Dst*-индекса для визуального просмотра его динамики и идентификации геомагнитных бурь получены из Мирового центра данных в Киото (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html). Кроме того, использовались среднечасовые данные параметров плазмы солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (ММП) и индексов геомагнитной активности (*Kp*, *Dst* и *AE*) из базы данных OMNI, полученные с вебсайта (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>).

Программное обеспечение позволяло выполнять непрерывный анализ динамических спектров УНЧ-колебаний, полученных по цифровой регистрации магнитного поля в обсерватории Восток в течение нескольких часов и даже суток. За анализируемый период отбирались дни одно-

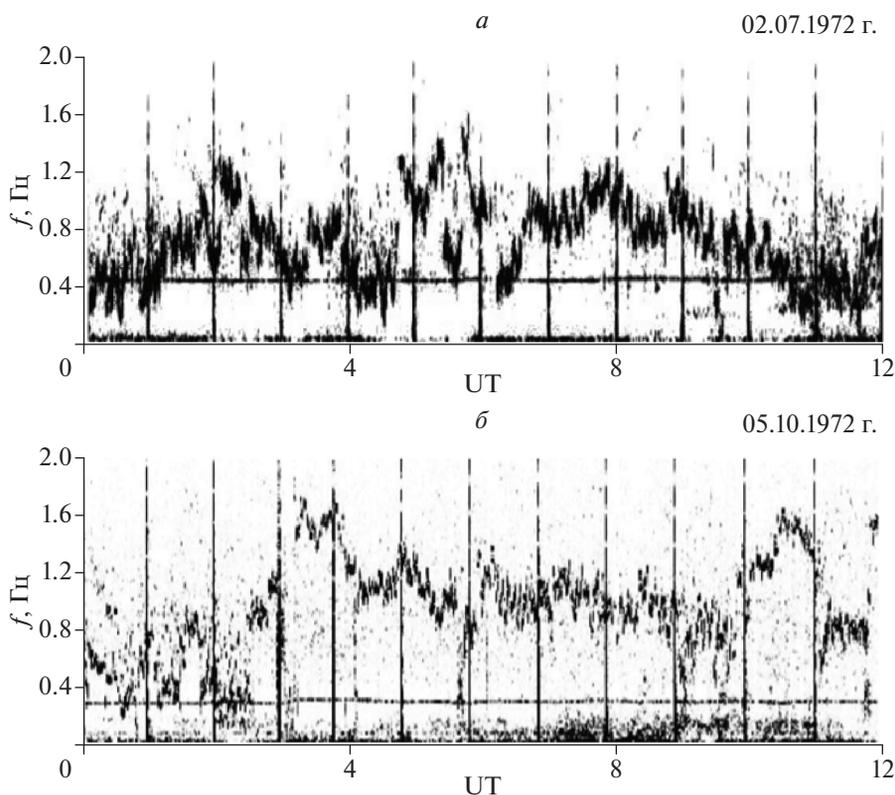


Рис. 1. Примеры динамических спектров “серпентинной эмиссии”, наблюдаемой в obs. Восток (а) — 02.07.1972 г. и (б) — 05.10.1972 г. при слабой геомагнитной активности ($K_p \sim 0-1$).

временных наблюдений внезапных начал магнитных бурь и “серпентинной эмиссии”. Всего было проанализировано 92 случая наблюдения SSC, к которым имелись данные регистрации SE. В качестве примера на рис. 1 приведены фрагменты динамических спектров “серпентинной эмиссии”, наблюдаемой в obs. Восток: (а) — 02.07.1972 г. и (б) — 05.10.1972 г. в интервале времени 0–12 UT. Как уже упоминалось выше, динамический спектр эмиссии имеет вид непрерывно извивающейся полосы и отражает характерную особенность SE — глубокую модуляцию несущей частоты. В спектре эмиссии видны различные периоды модуляции несущей частоты. Оба случая SE наблюдались в условиях спокойной магнитосферы ($K_p \sim 0-1$).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. “Серпентинная эмиссия” анализировалась на достаточно больших временных интервалах, охватывающих несколько часов до и после момента SSC. В результате анализа полученных динамических спектров SE было обнаружено, что в момент SSC в obs. Восток наблюдается шумовое широкополосное электромагнитное излучение в диапазоне Pc1–2 с резким передним фронтом. В это же время происходит нарушение режима ге-

нерации “серпентинной эмиссии”, которая прерывается на несколько часов, и затем вновь возобновляется. Подобная тенденция поведения “серпентинной эмиссии” в полярной шапке во время SSC, а именно, прерывание ее режима в момент прихода ударной волны к Земле наблюдалась в более чем 80% случаев (75 из 92 случаев).

На рисунке 2 показаны примеры наблюдения SE в дни с SSC, отражающие типичное поведение эмиссии в момент прихода ударной волны. На обоих рисунках вверху представлена динамика среднечасовых значений наиболее геоэффективных параметров солнечного ветра: динамического давления солнечного ветра (P_{dyn}) и B_z -компоненты ММП, резкие изменения которых свидетельствуют о подходе к Земле неоднородности солнечного ветра и соответственно о внезапном начале бури. В средней части рисунков показаны фрагменты наблюдений “серпентинной эмиссии” до и после момента SSC. Внизу рисунков даны вариации Dst - и AE -индексов, характеризующих развитие геомагнитной бури и суббуревой активности в ночном секторе магнитосферы, соответственно. Моменты SSC обозначены вертикальной стрелкой.

Остановимся подробнее на приведенных примерах. Так, на рис. 2а представлен фрагмент на-

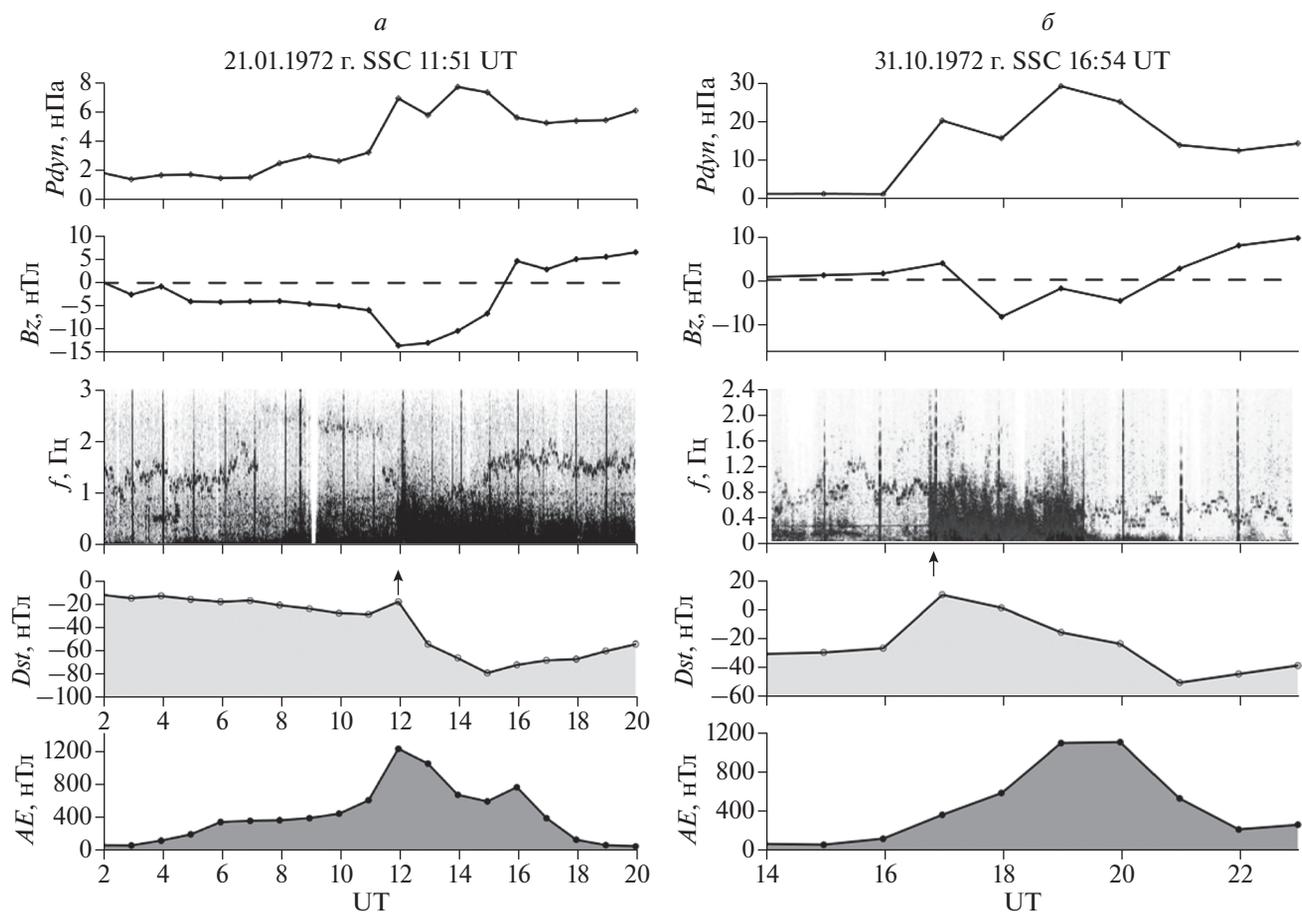


Рис. 2. Примеры нарушения режима генерации “серпентинной эмиссии” в obs. Восток во время SSC: (а) – 21.01.1972 г. (11.51 UT) и (б) – 31.10.1972 г. (16.54 UT). В верхней части рисунков даны вариации B_z -компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра (P_{dyn}), внизу – вариации Dst - и AE -индексов. Моменты SSC обозначены вертикальной стрелкой.

блюдения SE 21.01.1972 г. на интервале времени 02–20 UT. Видно, что в момент SSC в obs. Восток происходит нарушение режима генерации “серпентинной эмиссии” возникшим шумовым широкополосным электромагнитным излучением с резким передним фронтом. Эмиссия прерывается примерно на 1 ч, затем режим возбуждения восстанавливается. В данном случае развивается умеренная магнитная буря с минимальной величиной $Dst = -79$ нТл, которая в главную фазу сопровождается развитием суббури с интенсивностью более 1200 нТл. Фрагмент наблюдения SE 31.10.1972 г. на интервале 14–23 UT показан на рис. 2б. В этом примере в момент SSC (16.54 UT) также наблюдается широкополосное возмущение, нарушившее режим генерации SE . При этом развивается буря с минимальной величиной $Dst = -50$ нТл и суббури с интенсивностью более 1100 нТл. Примерно через 2.5 часа после момента SSC возбуждение эмиссии продолжается. В обоих случаях вблизи магнитопаузы регистрировалось увеличение динамического давления солнечного

ветра и больших отрицательных значений B_z -компоненты ММП, отражающих появление межпланетных возмущений, которые следуют за фронтом ударной волны.

3.2. Далее перейдем к статистическому анализу всех случаев “серпентинной эмиссии” во время SSC. Первоначально мы методом наложения эпох проанализировали динамику параметров плазмы солнечного ветра и ММП с целью выяснения межпланетных условий, на фоне которых происходит нарушение режима возбуждения SE . Рассматривались следующие параметры плазмы солнечного ветра и ММП: концентрация N , скорость V , динамическое давление солнечного ветра $P_{dyn} = \rho V^2$ (ρ – плотность плазмы), модуль напряженности B , B_x -, B_y -, B_z -компоненты ММП, β параметр, равный отношению теплового давления к магнитному: $\beta = NkT/(B^2/8\pi)$, где N и T – плотность (см^{-3}) и температура ($^\circ\text{K}$) плазмы протонов солнечного ветра, B – величина межпланетного магнитного поля (нТл). Параметры сол-

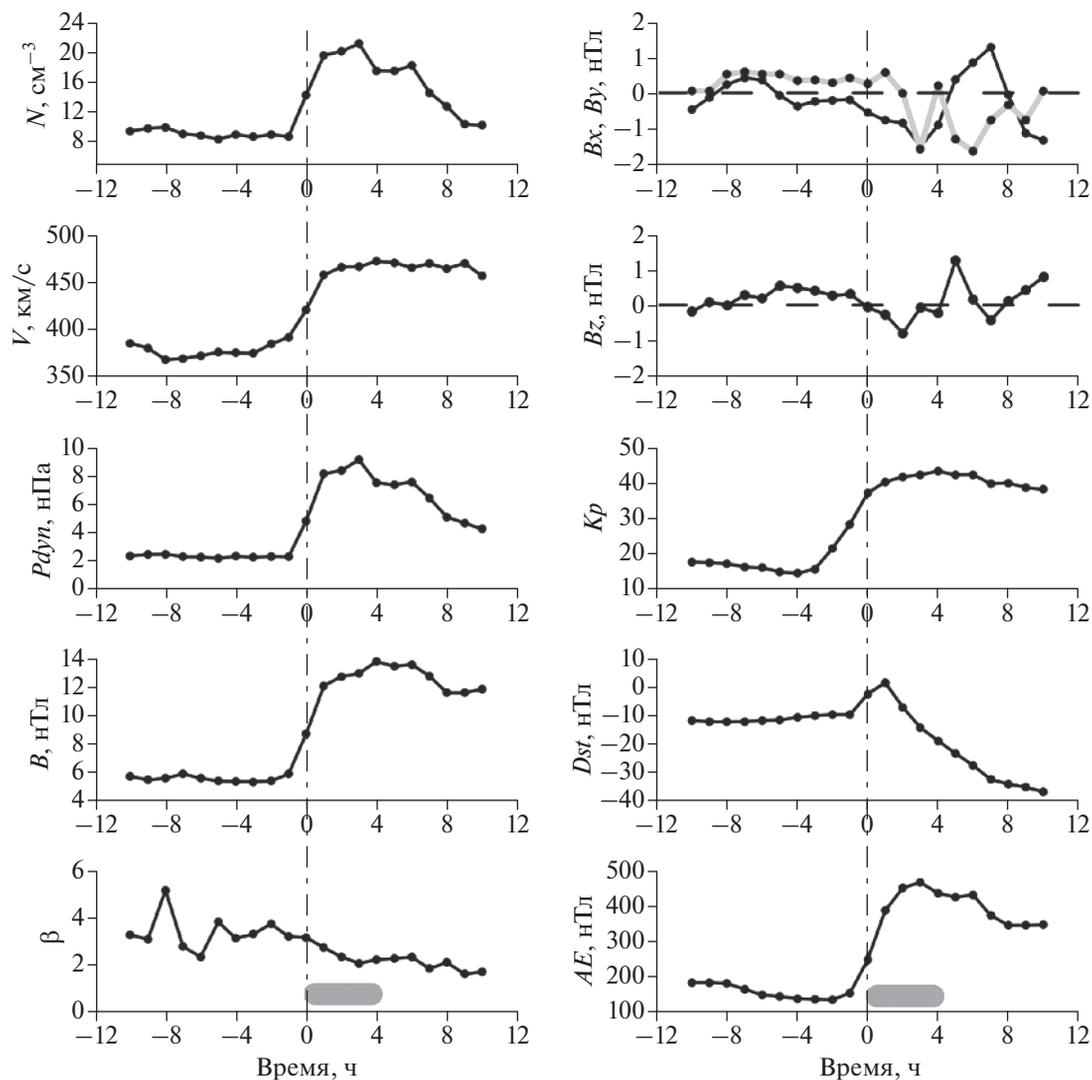


Рис. 3. Динамика усредненных параметров плазмы солнечного ветра, ММП и геомагнитных индексов, полученная методом наложения эпох для случаев нарушения режима возбуждения “серпентинной эмиссии” в обл. Восток.

нечного ветра и ММП анализировались в солнечно-эклиптической системе координат. Кроме того, оценивался уровень геомагнитной активности до и после момента SSC по величинам Kp -, Dst - и AE -индексов, которые отражают планетарную возмущенность, интенсивность магнитосферных кольцевых токов во время магнитных бурь и суббуревую активность, соответственно. Величина Kp индекса бралась, как принято в базе данных OMNI. За реперную точку принимался момент SSC. Все параметры анализировались на интервале 10 ч до и 10 ч после SSC.

На рисунке 3 представлена динамика усредненных часовых значений параметров, перечисленных выше. Внизу рисунка серыми толстыми линиями обозначена средняя продолжительность прерывания SE после SSC. Из рисунка 3 видно, что до момента SSC поведение параметров N , V ,

P_{dyn} , B и B_z -компоненты ММП соответствовало спокойному солнечному ветру. В их динамике до SSC не наблюдалось резких вариаций, и они были относительно стабильны. Вариация усредненных значений Kp -, Dst - и AE -индексов до момента SSC свидетельствовала о слабой планетарной возмущенности, возмущенности в средних и экваториальных широтах, а также авроральной активности. Именно такие спокойные условия в солнечном ветре и магнитосфере Земли благоприятны для наблюдения “серпентинной эмиссии” в полярной шапке.

В момент прихода ударной волны наблюдается увеличение плотности, скорости, рост динамического давления солнечного ветра и скачок модуля напряженности ММП от 1.5 до 2–3 и более раз. Резкие вариации параметров N , V , P_{dyn} , B в момент SSC неоднократно отмечались в публикациях.

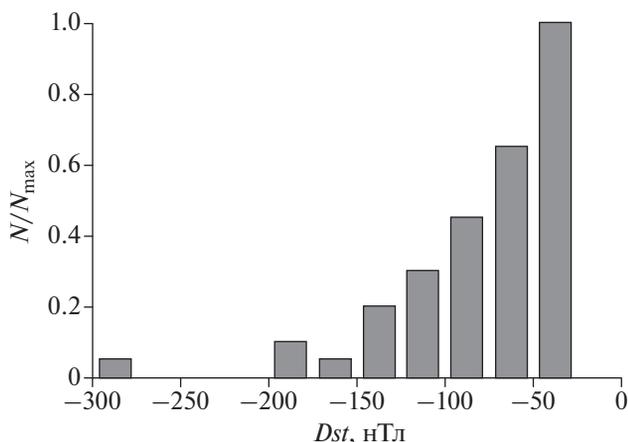


Рис. 4. Распределение минимальных значений Dst -индекса, характеризующих интенсивность геомагнитных бурь, возникающих после SSC.

Во время SSC, кроме отмеченных резких флуктуаций в динамике N , V , P_{dyn} , B , также наблюдаются изменения в поведении B_x — (черная кривая), B_y — (серая кривая) и B_z -компонент ММП. Так, B_z -компонента изменяет направление с северного на южное. Хотя в динамике B_x и B_y не наблюдалось резкой смены направления вблизи реперной точки в отличие от B_z -компоненты, но видно постепенное увеличение отрицательных значений этих компонент вблизи момента SSC. Величина параметра β , равная ~ 3 до момента SSC постепенно уменьшается, и становится близкой к 1 к моменту минимального значения Dst -индекса. Временной ход Kp -, Dst - и AE -индексов после SSC соответствует росту глобальной геомагнитной активности, развитию бурь и росту суббуревой активности. После SSC с появлением возмущенного солнечного ветра режим генерации SE нарушается. Таким образом, поведение рассмотренных параметров (рис. 3) отражает состояние межпланетной среды, на фоне которой происходит генерация SE и последующее нарушение ее режима.

3.3. Необходимо отметить, что в некоторых случаях после прихода к поверхности магнитосферы фронта ударной волны магнитные бури не развивались. Однако эмиссия прерывалась в момент SSC независимо от того, впоследствии развивалась буря или нет. Также на факт прерывания SE не влияла интенсивность развивающихся бурь после SSC. На рисунке 4 показано распределение минимальных величин Dst -индекса, характеризующих интенсивность геомагнитных бурь, возникающих после SSC. Для удобства анализа число геомагнитных бурь нормировано на их максимальное число. Согласно критерию из работы [Loewe and Prölss, 1997] по величине минимального значения Dst в нанотеслах различают три ти-

па геомагнитных бурь: слабые ($-50 < Dst \leq -30$), умеренные ($-100 < Dst \leq -50$) и сильные ($Dst \leq -100$) бури. Из рисунка 4 видно, что прерывание SE наблюдалось после случаев SSCs, которые стимулировали развитие бурь с различной интенсивностью от $Dst = -30$ нТл до $Dst = -300$ нТл. Однако в большинстве случаев к прерыванию SE приводили умеренные и слабые бури, судя по классификации бурь по величине Dst_{min} [Loewe and Prölss, 1997]. Тем не менее, независимо от типа бурь и их интенсивности имел место факт прерывания “серпентинной эмиссии” после момента SSC.

На рисунке 5а представлено нормированное на максимальное число событий распределение продолжительности временных интервалов (t), в течение которых “серпентинная эмиссия” не наблюдалась после момента SSC. В основном эмиссия прерывалась на 2–3 ч, хотя иногда величина t достигала 8–10 и более часов при среднем значении 4.0 ± 0.3 ч. Заметим, что продолжительность прерывания SE значительно больше длительности импульсов SSC, которая примерно составляет 2–10 мин. Сравним продолжительности интервала прерывания эмиссии с длительностями главной фазы бурь (τ). Используя данные Dst -индекса, мы оценили длительности главной фазы бурь. Длительность главной фазы бурь определялась от момента резкого уменьшения Dst -индекса до момента достижения его минимального значения, аналогично процедуре, описанной в работе [Ермолаев и др., 2007]. На рис. 5б показано нормированное на максимальное число случаев распределение длительностей главной фазы анализируемых бурь. В доминирующем числе случаев величина τ составляет 6–7 ч при среднем значении 10.9 ± 0.6 ч. Таким образом, сравнивая два распределения (рис. 5) мы приходим к заключению, что продолжительность интервалов прерывания SE существенно меньше длительностей главной фазы бурь и, соответственно, продолжительности самой бури.

3.4. Кроме эффекта нарушения режима генерации SE во время SSC, нами замечено, что во многих случаях наблюдается снижение несущей частоты (f) SE в течение некоторого интервала времени до момента наблюдения SSC. Для того чтобы выделить общие закономерности поведения несущей частоты SE в период, предшествующий моменту SSC был использован метод наложения эпох. За реперную точку принималось время наблюдения SSC. По динамическим спектрам SE оценивалась средняя несущая частота эмиссии на каждом временном интервале продолжительностью 30 мин в течение 5 ч до момента наблюдения SSC. На рисунке 6 показана динамика f , полученная методом наложения эпох по всем анализируемым случаям наблюдения SE . Из рисунка 6 видна четкая тенденция понижения несущей частоты SE примерно за 2 ч до момента

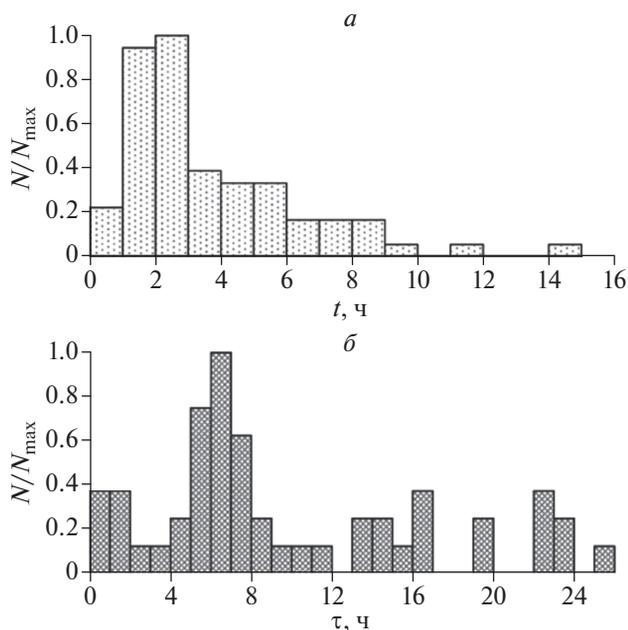


Рис. 5. Гистограммы: (а) — длительностей временных интервалов (t) прерывания “серпентинной эмиссии” после момента SSC и (б) — продолжительностей главной фазы магнитных бурь.

SSC. Зависимость усредненной несущей частоты *SE* от времени имеет нелинейный характер. Для наглядности показана аппроксимация экспериментальных данных ортогональным полиномом третьей степени. Коэффициент корреляции составляет 0.96, что свидетельствует о довольно хорошем соответствии экспериментальных данных аппроксимирующей кривой.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В область полярной шапки, в которой наблюдается “серпентинная эмиссия”, проектируются высокоширотные силовые линии открытого хвоста магнитосферы. Как известно [Нишида, 1980], магнитное поле в полярных шапках связано с ММП. Именно сюда непосредственно проникает плазма солнечного ветра и происходит непрерывное вторжение заряженных частиц из каспа. В полярных шапках магнитосферы наблюдается широкий спектр магнитных возмущений. В результате проведенного исследования в обл. Восток было обнаружено широкополосное электромагнитное излучение, возникающее в момент SSC. Обнаруженное излучение по своему внешнему виду и диапазону частот подобно шумовому излучению, которое после SSC наблюдалось на широте полярного каспа и в авроральном овале [Куражковская и др., 1997; Safargaleev et al., 2010]. Продолжительность шумового излучения совпадает с характерным временем прерывания эмиссии

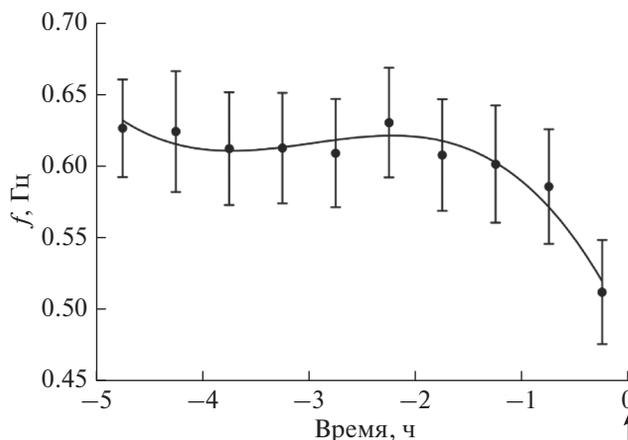


Рис. 6. Динамика несущей частоты (f) *SE*, полученная методом наложения эпох на интервале времени 5 ч, предшествующих моменту SSC. Нулевая точка на горизонтальной оси соответствует моменту SSC (показано стрелкой). Вертикальными линиями обозначены стандартные ошибки средних значений.

сии (в среднем 4 ч). Этот временной интервал значительно меньше длительности главной фазы (в среднем 10 ч) и продолжительности самой бури (рис. 5). Поскольку шумовое излучение наблюдается в обл. Восток независимо от того, развивается или нет буря после SSC, а также от интенсивности впоследствии возникающей бури, именно приход ударной волны к Земле можно рассматривать как основной триггер, прерывающий режим *SE*. Вместе с тем, временной интервал нарушения режима эмиссии существенно больше продолжительности импульса SSC (2–10 мин). Следовательно, время прерывания эмиссии может определяться только продолжительностью магнитосферных возмущений (несколько часов), которые следуют за фронтом ударной волны.

Анализ межпланетной обстановки показал, что электромагнитное излучение с глубокой модуляцией несущей частоты в полярной шапке прерывается, как только магнитосфера переходит в возмущенное состояние (рис. 3). Возмущенность магнитосферы связана с изменением условий в солнечном ветре и, главным образом, с процессами пересоединения силовых линий геомагнитного и межпланетного полей после поворота вертикальной компоненты ММП к югу ($Bz < 0$) [Прист и Форбс, 2005]. Благоприятным условием для развития процессов пересоединения является турбулентность плазмы [Lazarian et al., 2020]. Одним из параметров, контролирующих развитие процесса пересоединения [Phan et al., 2010] и уровень турбулентности плазмы солнечного ветра [Wang et al., 2018], является плазменный параметр β . Так, в работе [Trenchi et al., 2008] отмечается, что пересоединение наиболее вероятно при величине параметра $\beta \leq 2$. Согласно спутниковым

наблюдениям [Wang et al., 2018] в солнечном ветре достигается наибольшая степень турбулентности при $0.1 < \beta < 1.3$. Анализ динамики параметра β (рис. 3) показал, что до момента SSC в солнечном ветре плазменное давление доминирует над магнитным давлением ($\beta > 1$). После момента SSC величина параметра β солнечного ветра приближается к 1, устанавливается баланс теплового и магнитного давления. Факт понижения параметра $\beta \sim$ до 1.5 после момента SSC свидетельствует о максимальной турбулентности плазмы в потоках солнечного ветра. По-видимому, интенсивность шумовых излучений, возникающих после прихода к земной поверхности неоднородностей солнечного ветра с высокотурбулизованной плазмой, в несколько раз превышает амплитуду SE , что и приводит к нарушению режима ее генерации.

Если исходить из того, что источником энергии возникающих интенсивных шумовых излучений являются процессы пересоединения, то необходимо отметить, что область их локализации, скорее всего, смещена к флангам магнитосферы. Согласно [Hoshi et al., 2018], при отрицательном направлении V_x -компоненты ММП область пересоединения на магнитопаузе смещается от подсолнечной точки к югу. Действительно V_x -компонента ММП после момента SSC имеет отрицательное направление (рис. 3). В связи с этим можно предположить возможность проникновения возмущений, возникающих в результате процесса пересоединения, с южного фланга магнитосферы в область каспа и далее в полярную шапку.

С другой стороны, турбулентность плазмы солнечного ветра рассматривается в качестве драйвера геомагнитной активности, особенно в высоких широтах магнитосферы [D'Amicis et al., 2020]. Как показало проведенное исследование, после момента SSC плазма солнечного ветра характеризуется высоким уровнем турбулентности ($\beta \sim 1.5$), что также может быть источником шумового излучения, прерывающего “серпентинную эмиссию”. Результаты экспериментальных и теоретических исследований последних лет свидетельствуют о том, что турбулентность плазменного слоя хвоста определяет магнитосферную динамику, например, [Antonova and Stepanova, 2021]. При этом нельзя исключить и роль тока хвоста магнитосферы как источника геомагнитных возмущений в полярных широтах [Antonova et al., 2018]. Таким образом, турбулентность плазмы солнечного ветра в области пересоединения, по-видимому, может быть одним из ключевых факторов, влияющих на динамику SE .

Как уже отмечалось выше, примерно за 2 ч до момента SSC несущая частота “серпентинной эмиссии” постепенно уменьшается. Судя по вариации параметров солнечного ветра и ММП ни

один из параметров N , V , P_{dyn} , B , которые могли бы оказывать влияние на динамику несущей частоты SE , не обнаруживают подобного поведения к моменту SSC. Следовало ожидать, что эффект понижения несущей частоты может быть связан с постепенным изменением угла ψ от 0 до $\pi/2$ перед SSC [Гульельми и Довбня, 1974; Гульельми и др., 1975], который ответственен за глубокую модуляцию несущей частоты SE . Однако оказалось, что вариация $\cos\psi$, полученная методом наложения эпох для анализируемых событий (здесь мы не приводим динамику $\cos\psi$ и опишем ее словами), не испытывает каких-либо существенных изменений вблизи реперной точки. Величина $\cos\psi$ была ~ 1 как до момента SSC, так и после. Таким образом, обнаруженную нами закономерность снижения несущей частоты перед приходом фронта ударной волны не представляется возможным объяснить вариацией угла между скоростью и вектором напряженности ММП [Гульельми и Довбня, 1974; Гульельми и др., 1975]. Согласно [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015] “серпентинная эмиссия” возбуждается в солнечном ветре в результате ионно-циклотронной неустойчивости. В рамках этой гипотезы трудно понять понижение несущей частоты SE , поскольку величина магнитного поля начинает возрастать к моменту SSC. Альтернативным объяснением факта падения несущей частоты SE , с нашей точки зрения, могло быть предположение о том, что возбуждении SE происходит не в плазме солнечного ветра, а вблизи области пересоединения, в которой магнитные поля солнечного ветра и магнитосферы аннигилируют. Однако, исходя из имеющихся данных, не представляется возможным однозначно определить область генерации “серпентинной эмиссии”.

Заметим, что факт прерывания SE в момент SSC не находит аналогии с возбуждением других УНЧ-колебаний. По обыкновению эффект импульсов SSC проявляется либо в возбуждении режимов УНЧ-волн, либо в усилении интенсивности геомагнитных пульсаций, наблюдавшихся до момента SSC [Saito and Matsushita, 1967; Shumilov et al., 1996; Куражковская и др., 1996; Клейменова и др., 1999; Kerttula et al., 2001]. “Серпентинная эмиссия” в отличие других типов геомагнитных пульсаций в момент SSC прерывается. В рамках данной работы мы хотели обратить внимание на эту особенность поведения “серпентинной эмиссии”, морфологические закономерности которой и механизм генерации во многом остаются неясными.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа одновременных наблюдений “серпентинной эмиссии”, регистрируемой в полярной шапке, и внезапных начал геомагнит-

ных бурь обнаружено, что в момент SSC в обл. Восток наблюдалось шумовое широкополосное электромагнитное излучение в диапазоне Pc1–2 с резким передним фронтом, которое приводило к нарушению режима генерации “серпентинной эмиссии”. Нарушение возбуждения SE проявлялось в прерывании несущей частоты излучения с последующим возобновлением. По-видимому, интенсивность возникшего шумового излучения значительно больше амплитуды SE. Исследование параметров межпланетной среды показало, что наиболее благоприятными условиями для генерации SE являются спокойный солнечный ветер и слабая геомагнитная активность. Резкие флуктуации параметров солнечного ветра и ММП, возникающие в момент SSC способствуют нарушению режима генерации SE. Эффект прерывания SE отмечается в более чем 80% случаев независимо от того, развивается или нет впоследствии геомагнитная буря и от ее интенсивности. В доминирующем числе случаев время прерывания SE составляет ~2–3 ч, что значительно меньше продолжительности главной фазы и продолжительности самой бури. Показано, что несущая частота SE снижается примерно за 2 ч до момента SSC. Предполагается, что межпланетное возмущение, следующее за фронтом ударной волны, возбуждает широкополосное шумовое излучение в полярной шапке, которое нарушает режим генерации SE.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Мирного Центра Данных по Солнечно-Земной Физике (Москва) за предоставление открытого доступа к уникальным цифровым данным регистрации магнитного поля с высоким разрешением в Антарктической обсерватории Восток. Также авторы благодарны создателям базы данных OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) и World Data Centre for Geomagnetism (Kyoto) за возможность использования параметров солнечного ветра, ММП и данных *Kp*-, *AE*-, и *Dst*-индексов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории Борок Института физики Земли РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Гульельми А.В., Довбня Б.В. Гидромагнитное излучение межпланетной плазмы // Письма в ЖЭТФ. Т. 18. № 10. С. 601–604. 1973.
– Гульельми А.В., Довбня Б.В. Наблюдение геомагнитных пульсаций в диапазоне 0–2 Гц с глубокой модуляцией несущей частоты в полярной шапке // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 14. № 5. С. 868–870. 1974.

– Гульельми А.В., Довбня Б.В., Клайн Б.И. Возбуждение геомагнитных пульсаций типа “серпентинная эмиссия” в межпланетной плазме // Докл. АН СССР. Т. 221. № 6. С. 1314–1317. 1975.

– Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В. О происхождении частотной модуляции серпентинной эмиссии // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 2. С. 85–90. 2015.

<https://doi.org/10.12737/9617>

– Довбня Б.В., Зотов О.Д., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Динамика излучения типа SE перед мощными протонными вспышками на Солнце // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 34. № 3. С. 188–191. 1994.

– Довбня Б.В., Клайн Б.И., Гульельми А.В., Потапов А.С. Спектр частотной модуляции серпентинной эмиссии как отражение спектра солнечных колебаний // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 1. С. 59–62. 2017.

<https://doi.org/10.12737/23043>

– Довбня Б.В., Потапов А.С. Исследование частотной модуляции серпентинной эмиссии // Физика Земли. № 5. С. 19–26. 2018.

<https://doi.org/10.1134/S0002333718050058>

– Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. Т. 45. № 1. С. 3–11. 2007.

– Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли Ж., Шотт Ж.-Ж. Геомагнитные пульсации диапазона Pc3–5 на широтах полярного каспа во время SC и их глобальный отклик // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 39. № 4. С. 29–38. 1999.

– Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Довбня Б.В. Роль Vx-компоненты в генерации электромагнитного излучения в диапазоне частот 0.01–1.0 Гц во время SC // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 4. С. 151–154. 1997.

– Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 299 с. 1980.

– Пилипенко В.А., Довбня Б.В., Мартинес-Беденко В.А., Добровольский М.Н. Геомагнитные наблюдения на станции Восток советских Антарктических экспедиций: научная проблематика и архив данных // Вестн. ОНЗ РАН. Т. 12. NZ4003. 2020.

<https://doi.org/10.2205/2020NZ000366>

– Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 592 с. 1985.

– Прист Э., Форбс Т. Магнитное пересоединение: магнитогидродинамическая теория и приложения. М.: Физматлит, 592 с. 2005.

– Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Riazanseva M.O., Vovchenko V.V., Pulinetz M.S., Znatkova S.S., Sotnikov N.V. Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. V. 177. P. 103–114. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.013>

– Antonova E.E., Stepanova M.V. The impact of turbulence on physics of the geomagnetic tail // Front. Astron. Space Sci. 8:622570. 2021. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.622570>

– Araki T. A physical model of the geomagnetic sudden commencement // Solar Wind Sources of Magnetospheric

- Ultra-Low-Frequency Waves, Geophys. Monogr. Ser. V. 81 / edited by M. J. Engebretson, K. Takahashi, M. Scholer. AGU, Washington, D. C. P. 183. 1994.
- *Asheim S.* Serpentine emissions in the polar magnetic field. Report 83–38. Institute of Physics, University of Oslo, 8 pp. 1983.
- *D’Amicis R., Telloni D., Bruno R.* The effect of solar-wind turbulence on magnetospheric activity // *Front. Phys.* 8, 604857. 2020.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.604857>
- *Guglielmi A., Potapov A., Dovbnaya B.* Five-minute solar oscillations and ion-cyclotron waves in the solar wind // *Solar Phys.* V. 290. № 10. P. 3023–3032. 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0772-2>
- *Hoshi Y., Hasegawa H., Kitamura N., Saito Y., Angelopoulos V.* Seasonal and solar wind control of thereconnection line location on the Earth’sdayside magnetopause // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 123. P. 7498–7512. 2018.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025305>
- *Kerttula R., Mursula K., Pikkarainen T.* Storm-time Pc1 activity at high and middle latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 106. NO A4. P. 6213–6227. 2001.
<https://doi.org/10.1029/2000JA900125>
- *Lazarian A., Eyink G.L., Jafari A., Kowal G., Li H., Xu S., Vishniac E.T.* 3D Turbulent Reconnection: Theory, Tests & Astrophysical Implications // *Phys. Plasmas.* V. 27. 012305. 2020.
<https://doi.org/10.1063/1.5110603>
- *Loewe C.A., Pröls G.W.* Classification and Mean Behavior of Magnetic Storms // *J. Geophys. Res.* V. 102. NO. A7. P. 14209–14213. 1997.
<https://doi.org/10.1029/96JA04020>
- *Morris R.J., Cole K.D.* “Serpentine emission” at the high latitude Antarctic station, Davis // *Planet. Space Sci.* V. 35. P. 313–328. 1987.
- *Phan T.D., Gosling J.T., Paschmann G., Pasma C., Drake J.F., Øieroset M., Larson D., Lin R.P., Davis M.S.* The dependence of magnetic reconnection on plasma β and magnetic shear evidence from solar wind observation // *Astrophys J. Lett.* 719: L199–L203. 2010.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/719/2/L199>
- *Safargaleev V., Kozlovsky A., Honary F., Voronin A., Turunen T.* Geomagnetic disturbances on ground associated with particle precipitation during SC // *Ann. Geophys.* V. 28. P. 247–265. 2010.
<https://doi.org/10.5194/angeo-28-247-2010>
- *Saito T., Matsushita S.* Geomagnetic pulsations associated sudden commencements and sudden impulses // *Planet. Space Sci.* V.15. P. 573–587. 1967.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(67\)90163-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90163-8)
- *Shumilov O., Kasatkina E., Raspopov O., Hansen T., Frank-Kamenetsky A.* Sudden-commencement-triggered pulsations at high latitudes and their sources in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 101. NO A8. P. 17,355–17,363. 1996.
<https://doi.org/10.1029/96JA00400>
- *Trenchi L., Marcucci M.F., Pallochia G., Consolini G., Bavassano Cattaneo M.B., Di Lellis A. M., Reme H., Kistler L., Carr C.M., Cao J.B.* Occurrence of reconnection jets at the dayside magnetopause: Double Star observations // *J. Geophys. Res.* V. 113. A07S10. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012774>
- *Wang X., Tu C.-Y., He J.-S., Wang L.-H.* Ion-scale spectral break in the normal plasma beta range in the solar wind turbulence // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 123. P. 68–75. 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024813>