

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА *SE* ВО ВРЕМЯ СУББУРЬ

© 2023 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 28.09.2022 г.

После доработки 14.10.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Выполнено исследование одновременных наблюдений ультранизкочастотных колебаний в диапазоне частот 0.1–5.0 Гц типа “серпентинной эмиссии” (Serpentine Emission – *SE*), наблюдаемой в области полярной шапки, и возмущений в авроральной зоне. 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. За период 1966 (ноябрь, декабрь), 1968 (март–июль), 1970–1972, 1973 (январь–март) гг. проанализировано поведение “серпентинной эмиссии” во время развития 180-ти изолированных суббурь, выделенных по вариации *AL*-индекса. Обнаружено прерывание режима генерации “серпентинной эмиссии” в области полярной шапки во время активной фазы интенсивных изолированных суббурь (с максимальной величиной *AE*-индекса ~500–600 нТл). В фазу экспансии суббурь возникает шумовое широкополосное электромагнитное излучение с резким передним фронтом в диапазоне *Pc*1–2, также регистрируемое в полярной шапке. Шумовое излучение имеет резкий передний фронт и возникает примерно через 2 ч после переориентации *Bz*-компоненты ММП с северного направления на южное. Момент прерывания *SE* по времени совпадает с началом этого излучения и моментом достижения *Bz*-компонентой ММП максимальных отрицательных значений. Эффект прерывания *SE* наблюдается на фоне относительно стабильных других геоэффективных параметров солнечного ветра и ММП. Средняя продолжительность прерывания эмиссии составляет ~3 ч. Косвенным подтверждением воздействия суббуревой активности на режим генерации *SE* является совпадение закономерностей суточной и сезонной вариации интервалов прерывания *SE* и вероятности наблюдения суббурь. В связи с тем, что шумовое излучение возникает во время активной фазы изолированных суббурь, и спустя ~2 ч после переориентации *Bz*-компоненты ММП в солнечном ветре, есть основания полагать, что оно связано с потоками плазмы, направленными к Земле из хвоста магнитосферы. По-видимому, энергия плазменных потоков в активную фазу суббури стимулирует возникновение шумового излучения, прерывающего *SE*.

DOI: 10.31857/S0016794022600521, EDN: DLHUVK

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди огромного разнообразия ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний, регистрируемых на земной поверхности, недостаточно изученной продолжает оставаться так называемая “серпентинная эмиссия” (Serpentine Emission – *SE*). Эмиссия представляет собой УНЧ-излучение в диапазоне частот 0.1–5.0 Гц с характерной глубокой модуляцией несущей частоты, квазипериод которой варьирует от 1 до 60 мин [Гульельми и Довбня, 1973, 1974; Гульельми и др., 1975]. “Серпентинная эмиссия” была обнаружена в 70-х годах прошлого столетия в результате спектрально-временного анализа запи-

сей магнитного поля в обл. Восток (Антарктида). Термин “серпентинная эмиссия” был введен в работе [Гульельми и Довбня, 1973] на основании вида динамического спектра излучения, отдаленно напоминающего ползущую змею. Позднее [Asheim, 1983; Morris and Cole, 1987] электромагнитные колебания с глубокой модуляцией несущей частоты были обнаружены на других высокоширотных обсерваториях (Ny Alesund и Davis).

“Серпентинная эмиссия” относится к перманентным колебательным режимам, ее продолжительность может составлять от нескольких часов до нескольких дней. Типичным условием наблюдения *SE* является спокойная или умеренная гео-

магнитная активность (Kp -индекс $\sim 0-3$) [Довбня и Потапов, 2018]. Диапазон частоты SE формально совпадает с диапазоном широко известных пульсаций типа $Pc1-2$. Однако морфологические закономерности эмиссии существенно отличаются от спорадических и перманентных УНЧ-колебаний диапазона $Pc1-2$, морфология и физика которых изложена, например, в монографиях [Гульельми и Троицкая, 1973; Пудовкин и др., 1976].

Хотя наиболее характерные черты “серпентинной эмиссии” были описаны сразу после ее обнаружения [Гульельми и Довбня, 1973, 1974], многие неизвестные особенности эмиссии были выявлены в дальнейшем. Например, в работе [Довбня и др., 1994] при исследовании динамики “серпентинной эмиссии” перед появлением мощных протонных вспышек на Солнце было обнаружено возрастание квазипериода модуляции несущей частоты в среднем от 30 до 60 мин примерно за сутки до вспышки. Позднее было установлено, что в спектре периодов модуляции несущей частоты SE доминирующими являются 5-мин колебания, которые совпадают с 5-мин колебаниями фотосферы Солнца [Гульельми и др., 2015]. В одной из недавних работ авторами [Потапов и др., 2020] было обращено внимание на одновременное наблюдение “серпентинной эмиссии” вблизи северного и южного геомагнитных полюсов (в обсерваториях Туле и Восток). Это наблюдение свидетельствует об еще ранее неизвестном свойстве SE , а именно о сопряженности этих колебаний.

Несмотря на обнаружение новых закономерностей “серпентинной эмиссии”, ее интерпретация до настоящего времени остается до конца нерешенной проблемой. Из литературных источников известны, по крайней мере, две гипотезы о возникновении “серпентинной эмиссии”. Согласно первой гипотезе SE возбуждаются в межпланетной среде как ионно-циклотронные волны в результате неустойчивости протонов солнечного ветра [Гульельми и Довбня, 1973]. Возникновение второй гипотезы связано с обнаружением в спектре периодов модуляции несущей частоты 5-мин колебаний [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015]. Хотя периоды модуляции несущей частоты серпентинной эмиссии изменяются в широком интервале [Довбня и Потапов, 2018], модуляция с периодом ~ 5 мин является наиболее характерной и устойчивой в спектре вариаций частоты SE . В связи с этим появилось предположение [Довбня и др., 2017] о генетической связи 5-мин модуляции SE с 5-мин колебаниями поверхности Солнца [Прист, 1985]. В соответствии с последними полученными результатами предполагается, что “серпентинная эмиссия” самовозбуждается в результате ионно-циклотронной неустойчивости плазмы, а ее частота модулируется

волнами Альвена, исходящими от Солнца [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015].

С появлением в свободном доступе уникальных данных аналоговой регистрации короткопериодных вариаций геомагнитного поля, полученных на высокочувствительных индукционных магнитометрах советскими Антарктическими экспедициями на станции Восток и оцифрованных с высокой частотой (20 Гц) [Пилипенко и др., 2020], исследование морфологии “серпентинной эмиссии” было продолжено. Так, в работе [Куражковская и Клайн, 2022] по данным наблюдений магнитного поля в обл. Восток было исследовано влияние внезапных начал геомагнитных бурь (Sudden Storm Commencement – SSC) на режим генерации “серпентинной эмиссии”. В результате исследования был обнаружен эффект прерывания SE в момент $SSC \sim$ на 2–3 ч с последующим возобновлением. При этом отмечалась тенденция плавного снижения несущей частоты “серпентинной эмиссии” примерно за 2 ч до прихода фронта ударной волны [Куражковская и Клайн, 2022]. Нарушение режима генерации “серпентинной эмиссии” было вызвано шумовым широкополосным электромагнитным излучением с резким передним фронтом в диапазоне $Pc1-2$, возникающим в момент SSC . Предположительно источником широкополосного шумового излучения в полярной шапке могло служить межпланетное возмущение, следующее за фронтом ударной волны. Эффект прерывания “серпентинной эмиссии” оказался неожиданным, поскольку, по обыкновению, импульсы SSC приводят либо к возбуждению различных типов УНЧ-волн, либо к усилению их интенсивности, если они наблюдались до момента SSC , например, [Shumilov et al., 1996; Куражковская и др., 1997; Клейменова и др., 1999].

Как отмечалось выше, “серпентинная эмиссия” наблюдается в условиях спокойной и умеренно-возмущенной магнитосферы. Усиление возмущенности магнитосферы оказывает существенное влияние на режим генерации SE и поведение ее несущей частоты [Куражковская и Клайн, 2022]. Известно, что к геомагнитным возмущениям приводят не только геомагнитные бури, но и суббури. Суббуревая активность в ночной магнитосфере существенно влияет на возбуждение УНЧ-колебаний различных типов [Пудовкин и др., 1976] и, в частности, в частотном диапазоне $Pc1$. Так, в работе [Троицкая и др., 1973] обнаружено запаздывание генерации жемчужин в дневном секторе примерно на 30–120 мин относительно развития суббури на ночной стороне. Влияние суббуревой активности на возбуждение ионосферных альвеновских резонансов в диапазоне $Pc1$ проявляется в исчезновении резонансных спектральных полос в момент начала суббури и их появлении после ее окончания [Parent et al.,

2010]. В некоторых случаях наблюдалось резкое увеличение частотного интервала в резонансной структуре спектра УНЧ-излучения во время развития изолированной суббури [Семенова и Яхин, 2014].

Возможное влияние суббуровой активности на возбуждение “серпентиной эмиссии” до сих пор не исследовалось. В связи с этим представляет несомненный интерес сопоставление одновременных наблюдений “серпентинной эмиссии” в области полярной шапки и суббуровых возмущений магнитного поля в авроральном овале.

Целью данной работы является исследование влияния суббуровой активности на возбуждение “серпентинной эмиссии”.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исходным экспериментальным материалом служили 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., полученные из Мирового Центра Данных (МЦД) по Солнечно-Земной Физике (Москва) (http://www.wdcb.ru/arctic_ant-arctic/antarctic_magn_4.ru.html).

Также использовались графические представления *AL* индекса с 2.5 мин разрешением, опубликованные в книгах [Allen et al., 1966, 1968, 1971, 1972, 1973; Allen, 1970]. Дополнительно использовались среднечасовые данные параметров плазмы солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (ММП) и индексов геомагнитной активности (*ap*, *AL* и *AE*) из базы данных OMNI, полученные с вебсайта (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>).

С помощью программного обеспечения выполнялся непрерывный спектрально-временной анализ цифровой регистрации магнитного поля в обсерватории Восток в течение длительных интервалов времени от нескольких часов до нескольких дней. В результате анализа получали динамические спектры УНЧ-колебаний. Поскольку за анализируемые интервалы времени отсутствовали цифровые данные *AL*-индекса с 1 мин разрешением, графики *AL*-индекса предварительно были отсканированы и для удобства представлены в цифровом виде. Индекс *AL*, как известно, отражает интенсивность западного электроджета в полуночном и раннем утреннем секторах аврорального овала во время развития суббур в хвосте магнитосферы. Суббури отождествлялись по поведению *AL*-индекса, используя критерий идентификации суббур, подробно описанный в работе [Hsu and McPherron, 2004]. Из данной работы следует, что отрицательные бухты в динамике

AL-индекса продолжительностью более 20 мин и минимальной величиной *AL*-индекса ниже -100 нТл соответствуют развитию магнитосферных суббур. Для выявления возможного влияния суббуровых возмущений на динамику “серпентинной эмиссии” отбирались изолированные суббури. Суббура считалась изолированной, если фаза восстановления предыдущей суббури не содержала начало последующей суббури, т.е. чтобы спокойный временной интервал от предыдущего возмущения составлял не менее трех часов. Отбор изолированных суббур проводился визуальным просмотром суточных вариаций *AL*-индекса. Затем выполнялось одновременное сопоставление полученных динамических спектров *SE* с вариациями *AL*-индекса. Всего было проанализировано 180 случаев одновременных наблюдений изолированных суббур и “серпентинной эмиссии”.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Сопоставление одновременных наблюдений УНЧ-излучений в диапазоне *Pc1* и динамики *AL*-индекса показало, что до начала изолированных суббур в обс. Восток наблюдается “серпентинная эмиссия” в течение длительных интервалов времени. В фазу экспансии или в активную фазу суббури возникает шумовое широкополосное электромагнитное излучение с резким передним фронтом в диапазоне частот *Pc1*–2. В результате этого режим генерации *SE* нарушается, что проявляется в прерывании несущей частоты эмиссии на некоторое время. Заметим, что аналогичное поведение *SE* наблюдалось во время *SSC* [Куражковская и Клайн, 2022], когда к земной поверхности приходил фронт ударной волны. Характерно, что шумовые излучения, возникающие в момент *SSC*, и во время активной фазы суббури были подобны по внешнему облику и диапазону частот. В фазу восстановления суббури режим возбуждения “серпентинной эмиссии” возобновлялся. Эффект прерывания “серпентинной эмиссии” характерен для взрывной фазы всех анализируемых изолированных суббур.

На рисунке 1 представлены типичные примеры нарушения режима генерации “серпентинной эмиссии” на обс. Восток во время развития изолированных суббур 26–27.07.1970 г. и 19.03.1971 г. В верхней части рисунков приведены динамические спектры *SE*, в нижней части представлена вариация *AL*-индекса. В динамике *AL*-индекса анализировался интервал времени, предшествующий началу суббури длительностью ~ 5 часов, затем промежуток времени, в течение которого наблюдалась взрывная фаза и фаза восстановления суббури. Отрицательная бухта в динамике *AL*-индекса свидетельствует об интенсификации суббуровой активности в авроральной зоне. В обоих примерах наблюдались суббури, интенсивность

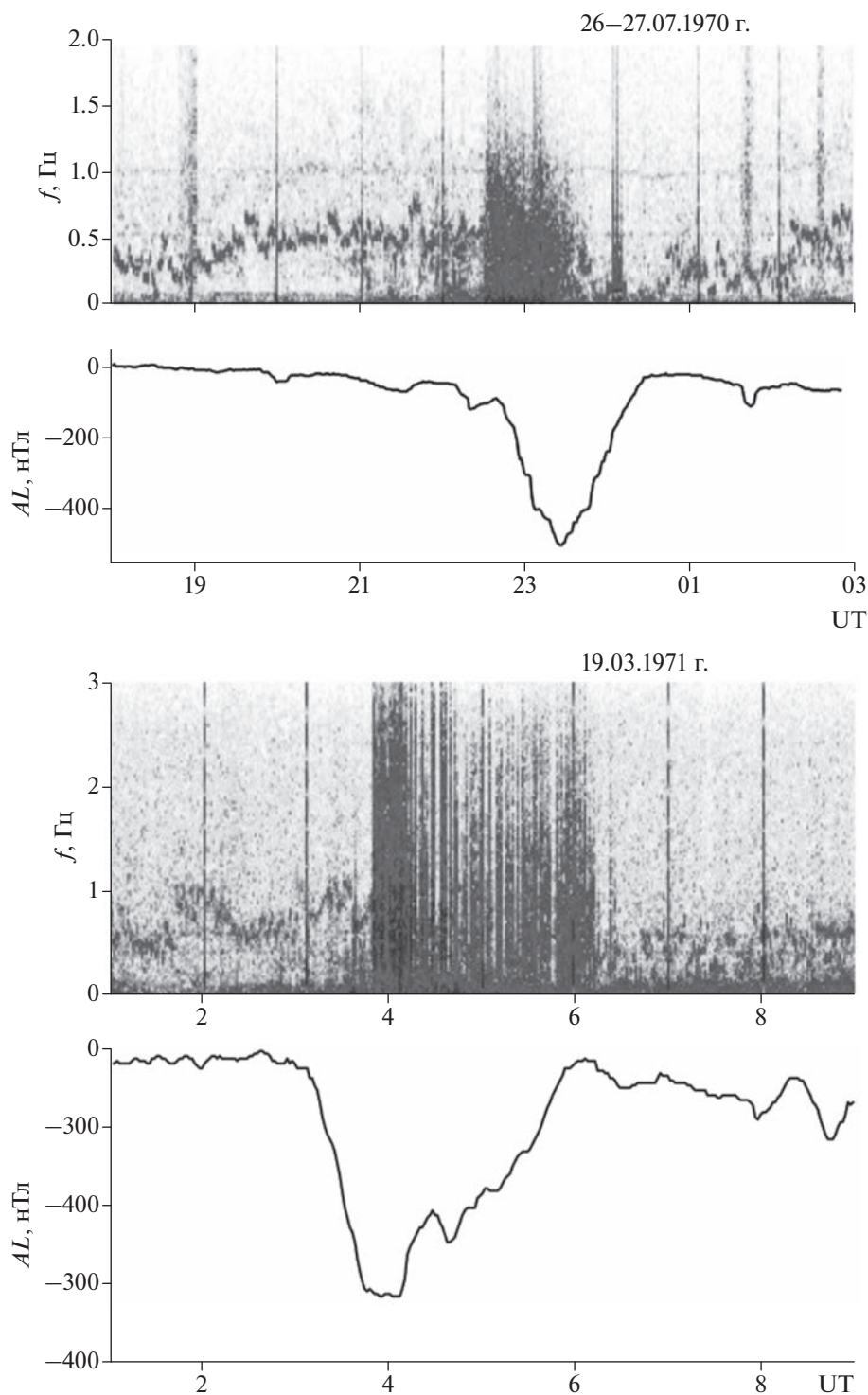


Рис. 1. Типичные примеры нарушения режима генерации “серпентинной эмиссии” в обл. Восток во время развития изолированных суббурь в авроральном овале: (а) – 26–27.07.1970 г., (б) – 19.03.1971 г. В верхней части рисунков представлены динамические спектры УНЧ-колебаний, внизу – вариации AL -индекса.

которых, оцененная по максимальной величине AE -индекса, была >300 нТл. Видно, что в течение нескольких часов до начала суббури в обл. Восток наблюдается типичный режим “серпентинной эмиссии”. Во время взрывной фазы суббури воз-

никает шумовое широкополосное электромагнитное излучение с резким передним фронтом в диапазоне $Pc1-2$, прерывающее возбуждение SE . Время прерывания и возобновления генерации SE совпадало с началом и соответственно с окон-

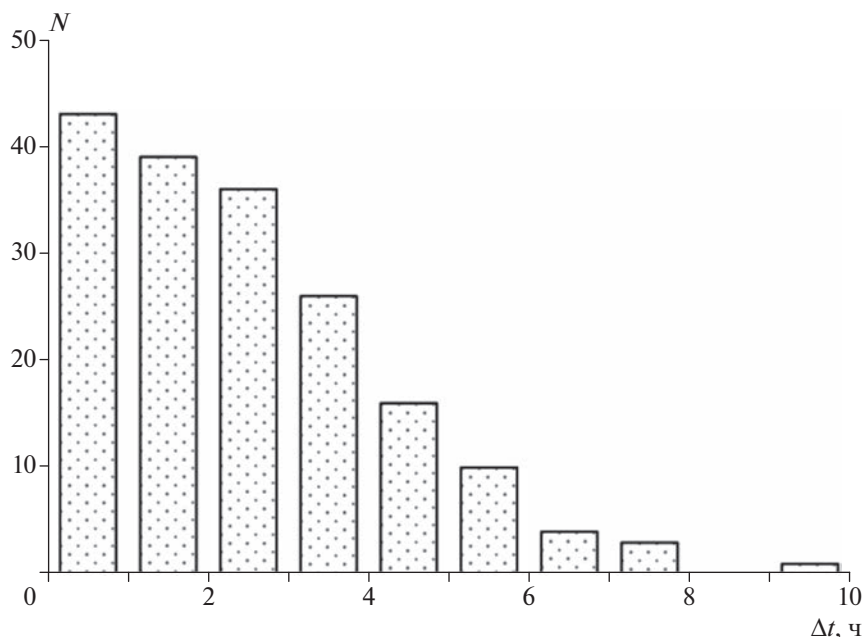


Рис. 2. Распределение длительностей временных интервалов (Δt) прерывания “серпентинной эмиссии” во время изолированных суббурь.

чением наблюдения широкополосного шумового электромагнитного излучения. В фазу восстановления суббури возбуждение *SE* продолжалось вплоть до начала следующей суббуревой активизации. Необходимо заметить, что прерывание “серпентинной эмиссии” наблюдалось как на фоне развития изолированной суббури, так и на фоне серий суббуревых активизаций в авроральном овале.

3.2. Временной интервал (Δt), в течение которого наблюдалось прерывание “серпентинной эмиссии”, был разным по величине для каждой суббури и изменялся в широких пределах от 1 до 10 ч. Среднее значение Δt по всем анализируемым случаям составляло 3.0 ± 0.1 ч. На рис. 2 показано распределение продолжительности часовых интервалов (Δt), в течение которых эмиссия прерывалась в ходе развития изолированных суббурь. Преимущественно время прерывания “серпентинной эмиссии” составляло $\sim 1-2$ ч. Однако, если в авроральном овале наблюдалась последовательность суббурь, то время прерывания “серпентинной эмиссии” существенно увеличивалось и могло достигать более 20 часов.

Одной из основных характеристик интенсивности суббурь в зоне полярных сияний является величина *AE*-индекса. Для выяснения зависимости эффекта прерывания *SE* от интенсивности изолированных суббурь было построено распределение значений *AE*-индекса. Для каждого анализируемого случая брались максимальные значения *AE*-индекса, соответствующие взрывной

фазе суббури. На рис. 3 дана зависимость числа случаев прерывания эмиссии от мощности изолированных суббурь. Видно, что величина *AE*-индекса, изменялась в широком диапазоне от 100 до 1400 нТл при среднем значении 536 нТл. Иными словами эффект прерывания *SE* наблюдался, как во время развития суббурь низкой и средней интенсивности, так и в период развития больших суббурь. Однако в доминирующем числе случаев “серпентинная эмиссия” прерывалась во время развития суббурь с интенсивностью *AE* $\sim 500-600$ нТл, т.е. относительно больших суббурь.

3.3. В работе [Fraser-Smith, 1982] отмечалось, что “серпентинная эмиссия” не имеет четко определенной суточной вариации частоты появления. Тем не менее, представляет интерес выяснить, существует ли зависимость интервалов прерывания эмиссии от локального времени. На рис. 4 представлено распределение числа часовых интервалов прерывания *SE* в зависимости от MLT. Суточная вариация интервалов прерывания *SE* имеет бимодальный характер. Четко выделяются два широких максимума. Первый большой максимум наблюдается в окрестности местной полночи и соответствует интервалу (21:00–00:04 MLT) или (22:00–00:05 UT), второй поменьше приходится на пред полуденные часы (00:07–12:00 MLT) или (00:08–13:00 UT).

Согласно [Гульельми и Довбня, 1974] сезонная вариация активности “серпентинной эмиссии” имеет максимум зимой и минимум летом, т.е. в зимнее и летнее солнцестояние, соответственно.

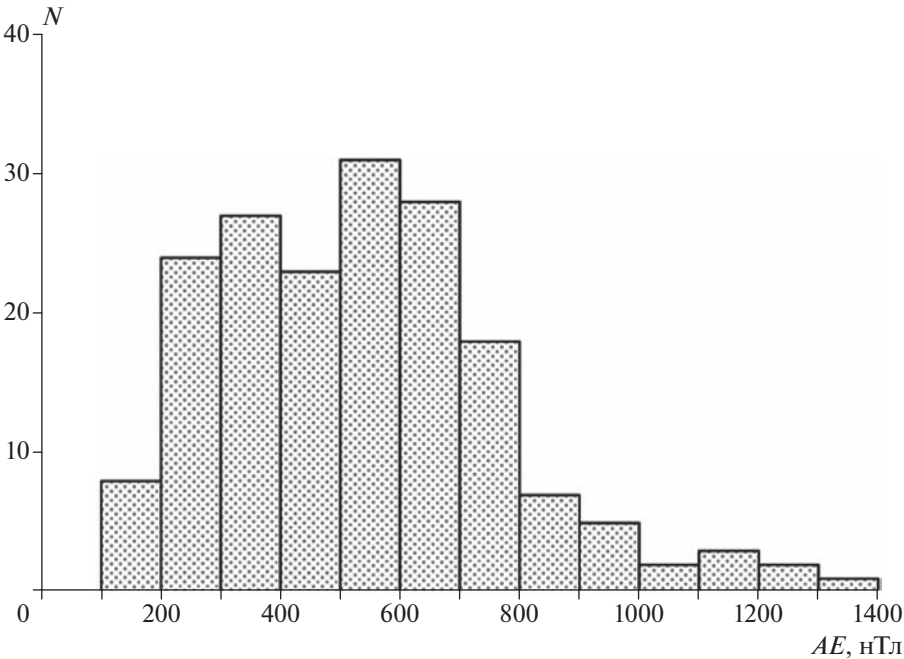


Рис. 3. Зависимость числа случаев прерывания “серпентинной эмиссии” (N) от максимальной интенсивности суббурь, характеризуемой величиной AE -индекса.

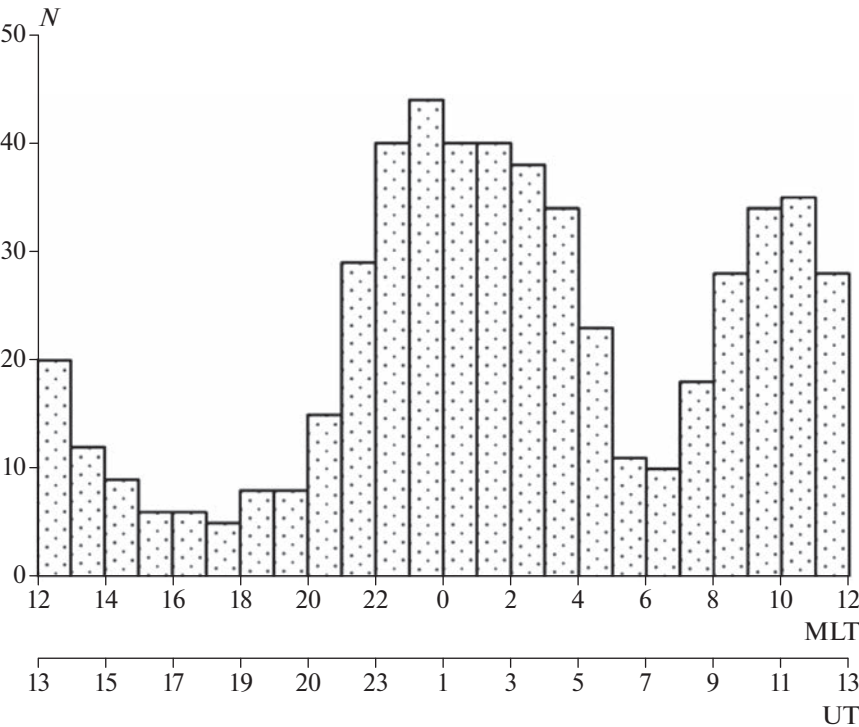


Рис. 4. Суточная вариация часовых интервалов прерывания “серпентинной эмиссии” во время развития изолированных суббурь.

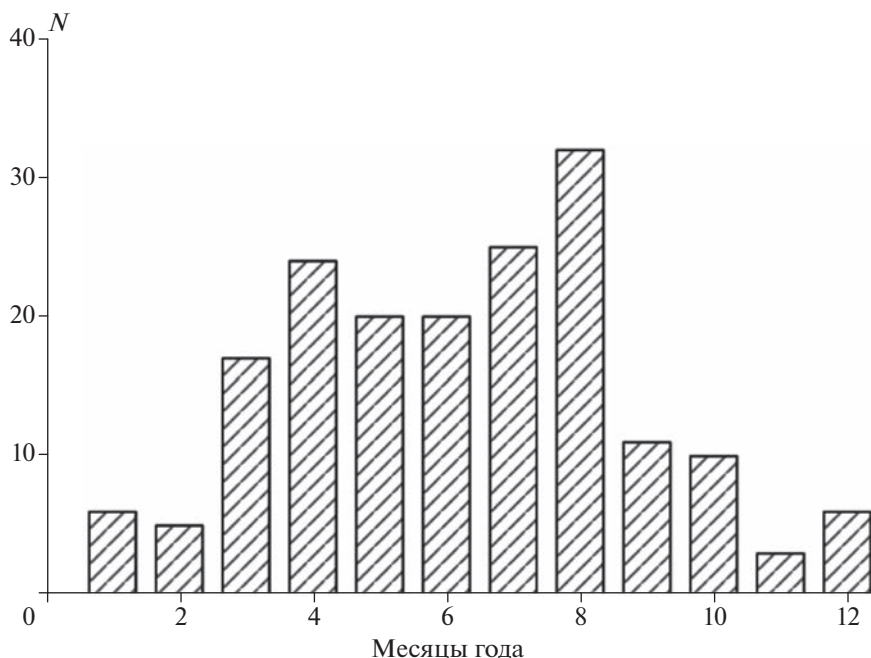


Рис. 5. Зависимость числа случаев прерывания “серпентинной эмиссии” от сезона во время развития изолированных суббурь.

На рисунке 5 показана сезонная вариация часовых интервалов прерывания *SE*. Для зависимости вариации интервалов прерывания эмиссии характерны два максимума в весеннее и осеннее равноденствие (август и апрель в южном полушарии соответственно). В зимний и летний сезон эффект прерывания эмиссии проявляется в меньшей степени, чем весной и осенью. В этой связи необходимо заметить, что сезонная вариация интервалов прерывания *SE* совпадает с сезонной вариацией геомагнитной активности [Russell and McPherron, 1973]. Усиление возмущенности магнитосферы приводит к нарушению режима генерации эмиссии преимущественно в сезон весеннего и осеннего равноденствий.

3.4. Далее был выполнен анализ межпланетных условий и геомагнитной активности, на фоне которых происходит нарушение режима возбуждения *SE* во время авроральных активизаций. Методом наложения эпох была проанализирована динамика следующих среднечасовых параметров 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, E_y -компонента электрического поля солнечного ветра. Все параметры анализировались в солнечно-эклиптической системе координат. В качестве характеристики геомагнитной активности рассматривались ap - и AL -индексы, которые отражают глобальную возмущенность и активность суббурь в авроральном овале соответ-

ственно. За реперную точку принимался момент начала прерывания “серпентинной эмиссии” (или момент возникновения широкополосного электромагнитного возмущения). Все параметры анализировались на интервале 10 ч до и 10 ч после начала прерывания “серпентинной эмиссии”.

На рисунке 6 представлена динамика усредненных часовых значений анализируемых параметров. В нижней части рисунка серыми прямоугольниками показана средняя продолжительность интервала прерывания *SE* после возбуждения широкополосного электромагнитного излучения. Как видно из рис. 6, как до нулевой точки, так и после поведения параметров N , V , P_{dyn} , B , B_x -, B_y -компонент ММП было относительно стабильным. В их динамике не наблюдалось резких флуктуаций. Наиболее существенные изменения видны в поведении параметров (B_z , E_y) и индексов (ap , AL). Примерно за 2 ч до нулевой точки B_z изменяет направление с северного на южное. Поведение E_y -компоненты электрического поля солнечного ветра зеркально отражает поведение B_z . В динамике AL -индекса наблюдается отрицательная бухта, которая свидетельствует о развитии суббурь в зоне сияний. Рост значений ap -индекса за 2 ч до реперной точки указывает на увеличение глобальной возмущенности магнитосферы. Следует отметить, что на длительных интервалах времени, предшествующих развитию суббурь в полярной шапке регистрируется “серпентинная эмиссия”. Как правило, эти временные интервалы соответствуют спокойным усло-

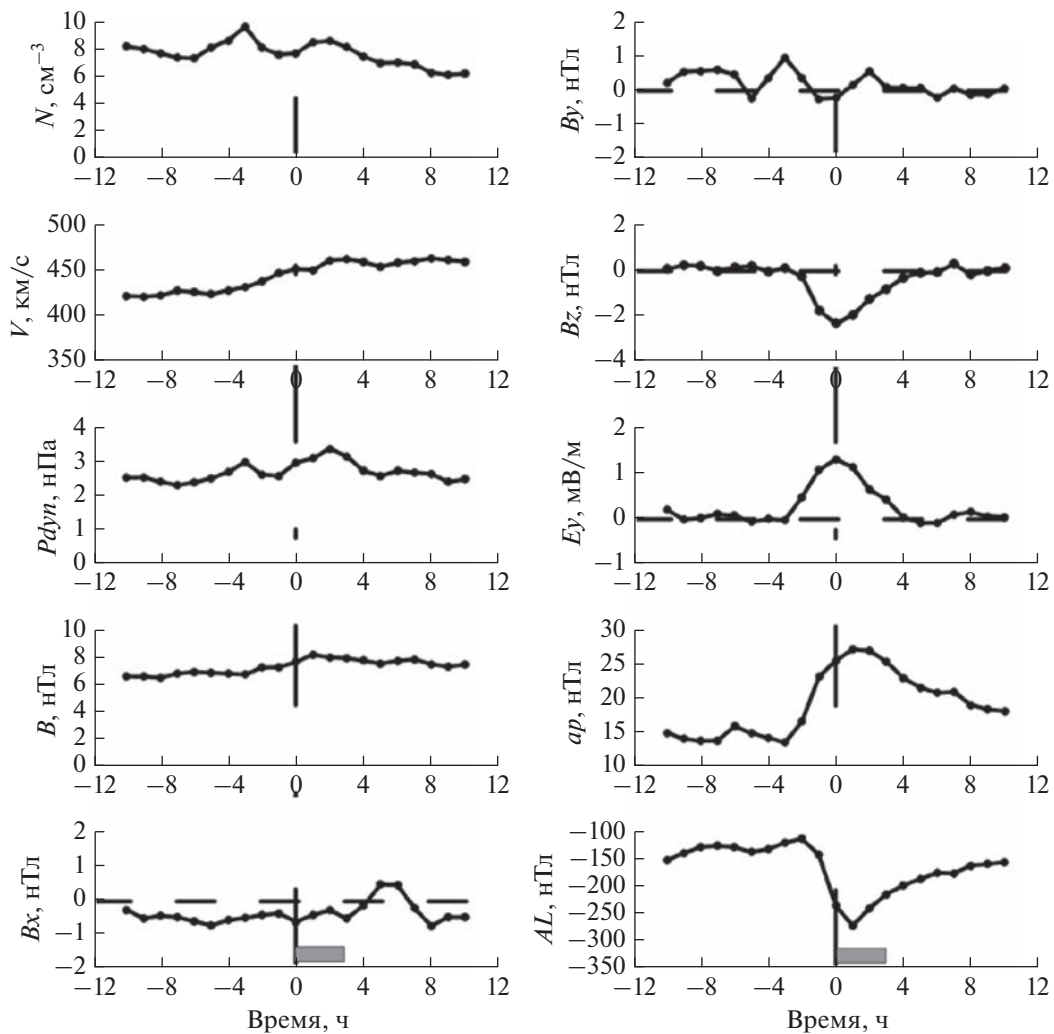


Рис. 6. Динамика средних характеристик межпланетной среды и индексов геомагнитной активности, полученная методом наложения эпох для случаев нарушения режима возбуждения серпентиной эмиссии в обл. Восток во время развития изолированных суббурь.

виям в солнечном ветре и магнитосфере Земли. Именно такая геофизическая обстановка благоприятна для возбуждения серпентиной эмиссии в полярной шапке.

Согласно усредненной динамике параметров солнечного ветра и ММП (рис. 6) шумовое излучение с резким передним фронтом возникает примерно через 2 ч после переориентации B_z -компоненты ММП с северного направления на южное. Заметим, что другие геоэффективные параметры солнечного ветра и ММП остаются относительно стабильными на протяжении всего анализируемого временного интервала. Момент прерывания SE по времени совпадает с началом этого излучения и моментом достижения B_z -компонентой ММП максимальных отрицательных значений. При этом E_y -компонента электрического поля солнечного ветра также достигает

максимума. К этому моменту времени магнитосфера приходит в возмущенное состояние, о чем свидетельствует существенное увеличение ap -индекса. Судя по динамике AL -индекса, в авроральном овале наблюдается активная фаза суббури. Именно в это время в полярной шапке возникает широкополосное электромагнитное излучение. Его интенсивность, по-видимому, существенно выше, чем амплитуда “серпентинной эмиссии”. В результате происходит нарушение режима генерации эмиссии. Затем, когда магнитосфера возвращается в спокойное состояние, режим генерации SE возобновляется (в фазу восстановления суббури).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Одновременное сопоставление УНЧ-излучения в диапазоне частот 0.1–5.0 Гц (“серпентинная

эмиссия”), регистрируемого в области полярной шапки, и суббуревой активности в авроральной зоне показало, что воздействие изолированных суббурь на *SE* проявляется в прерывании ее режима генерации. Традиционно считается, что B_z -компонента ММП является одним из самых геоэффективных параметров для развития магнитосферных возмущений, в том числе и суббурь [Воробьев и др., 2018]. Судя по динамике межпланетных параметров (рис. 6), наиболее вероятным источником магнитосферных возмущений, приводящих к развитию суббурь, могла служить B_z -компонента ММП, т.к. в ее усредненной вариации наблюдается смена направления с северного на южное направление. Активная фаза суббурь наблюдается при южной ориентации B_z -компоненты ММП. Отсутствие значимых вариаций в динамике других межпланетных параметров вблизи реперной точки (рис. 6) свидетельствует о том, что вряд ли с ними мог быть связан процесс суббуревой активизации.

Как известно, модель развития суббури включает в себя, по крайней мере, три последовательных этапа: предварительная фаза, фаза развития и фаза восстановления. Согласно [Пудовкин и др., 1976] каждому этапу развития суббури соответствует возбуждение того или иного типа геомагнитных пульсаций. Причем, генерация пульсаций происходит в определенной последовательности по мере развития суббури. Например, в восстановительную фазу суббури в вечернем секторе возбуждаются неструктурированные пульсации диапазона $Pc1-2$ [Пудовкин и др., 1976]. Однако имеют место и случаи прекращения геомагнитных пульсаций в момент начала суббури на ночной стороне. Так, в работе [Клейменова и др., 1998] был установлен факт прекращения длиннопериодных иррегулярных пульсаций *ipcl* (irregular pulsations continuous long period) с периодами от 3 до 15–25 мин, наблюдаемых в области дневного каспа, с началом интенсивной суббури. Аналогичная тенденция характерна и для “серпентинной эмиссии”, проникающей в область полярной шапки из межпланетного пространства. В обоих случаях суббури не стимулируют возбуждение и не способствуют усилению интенсивности геомагнитных пульсаций, а наоборот приводят к нарушению режима их генерации. В ходе исследования было установлено, что непрерывно наблюдаемая часами и сутками “серпентинная эмиссия” прерывается в активную фазу суббури в среднем на 3 ч.

Тот факт, что прерывание *SE* в полярной шапке каким-либо образом связано с развитием суббурь косвенно подтверждается следующими фактами. Например, интервалы наблюдения прерывания эмиссии по мировому времени и времена суббуревых активизаций практически совпадают. Согласно [Fu et al., 2021] для активизации суббурь

характерны два временных интервала (00:06–12:00 UT) и (18:00–24:00 UT). В примерно эти же интервалы времени преимущественно наблюдается прерывание *SE* (рис. 4). Кроме того, эффект прерывания *SE* возникает, в основном, во время развития интенсивных суббурь ($AE \sim 500-600$ нТл), которые, как показано в работе [Tanskanen, 2009], наблюдаются преимущественно в весеннее и осеннее равноденствие. Действительно, в сезонной вариации числа случаев прерывания “серпентинной эмиссии” выделяются также два максимума в весеннее и осеннее равноденствие (рис. 5), что совпадает с вероятностью наблюдения интенсивных суббурь в зависимости от сезона.

По нашему мнению, главным фактором, стимулирующим прерывание “серпентинной эмиссии” является возникающее в фазу развития суббури широкополосное электромагнитное излучение в диапазоне $Pc1-2$. По-видимому, его интенсивность значительно больше амплитуды эмиссии, что и приводит к наблюдаемым эффектам. Заметим, что шумовое излучение, прерывающее “серпентинную эмиссию” во время *SSC*, возникало в момент переориентации B_z -компоненты ММП с северного направления на южное [Куражковская и Клайн, 2022], что указывало на то, что его источником могло быть возмущение, следующее за фронтом ударной волны. В данном случае аналогичное шумовое излучение появляется в момент достижения B_z -компонентой ММП максимальных отрицательных значений, когда развивается активная фаза суббури (рис. 6). Учитывая характерное время между моментом переориентации B_z -компоненты и моментом достижения ею максимальных отрицательных значений (~ 2 ч), можно предположить, что широкополосное электромагнитное излучение, скорее, является следствием процессов, происходящих в хвосте магнитосферы.

Таким образом, с одной стороны, “серпентинная эмиссия” самовозбуждается в результате ионно-циклотронной неустойчивости в межпланетной плазме и проникает в область полярной шапки [Гульельми и др., 2015; Guglielmi et al., 2015]. Вопрос о том, как распространяются геомагнитные пульсации в диапазоне $Pc1-2$ с глубокой модуляцией несущей частоты из солнечного ветра в область полярной шапки, остается открытым. С другой стороны, согласно нашим результатам, шумовое широкополосное электромагнитное излучение, прерывающее возбуждение *SE* также наблюдается в полярной шапке. Поскольку это излучение возникает во время активной фазы изолированных суббурь, и спустя ~ 2 ч после переориентации B_z -компоненты ММП в солнечном ветре, есть основания полагать, что оно связано с потоками плазмы, направленными к Земле из хвоста магнитосферы. Проблема механизма воздействия шумового излучения на “серпентинную эмиссию” требует дальнейших исследова-

ний. Тем не менее, следует еще раз обратить внимание на схожесть характеристик широкополосных электромагнитных излучений (внешний облик, диапазон частот, резкий передний фронт), наблюдаемых как во время *SSC*, так и во время развития суббурь и приводящих к одинаковому эффекту, а именно к прерыванию “серпентинной эмиссии”, регистрируемой в полярной шапке.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ одновременных наблюдений УНЧ-колебаний в диапазоне частот 0.1–5.0 Гц и возмущений в авроральной зоне показал, что во время активной фазы интенсивных изолированных суббурь ($AE \sim 500\text{--}600$ нТл) в области полярной шапки возникает шумовое широкополосное электромагнитное излучение с резким передним фронтом, нарушающее режим генерации “серпентинной эмиссии”. Момент прерывания *SE* по времени совпадает с началом этого излучения и с моментом достижения *Bz*-компонентой ММП максимальных отрицательных значений. *Bz*-компонента ММП являлась наиболее вероятным источником магнитосферных возмущений, приводящих к развитию суббурь. Другие геоэффективные параметры солнечного ветра и ММП оставались относительно стабильными во время развития суббурь. Средняя продолжительность прерывания эмиссии составляет ~ 3 ч. Эффект прерывания *SE* наблюдался преимущественно вблизи местной полночи и в предполуденное время. В сезонной вариации случаев прерывания *SE* выделяются два максимума в сезон весеннего и осеннего равноденствий. Закономерности суточной и сезонной вариации интервалов прерывания *SE* совпадают с суточной и сезонной вариацией вероятности наблюдения суббурь.

Исходя из того, что характерное время между моментом переориентации *Bz*-компоненты и достижением ею максимальных отрицательных значений составляет ~ 2 ч, можно предположить, что широкополосное электромагнитное излучение, скорее, является следствием процессов, происходящих в хвосте магнитосферы, и связано с потоками плазмы, направленными к Земле в фазу экспансии суббури. По-видимому, энергия плазменных потоков в активную фазу суббури стимулирует возникновение шумового излучения, прерывающего *SE*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Мирового 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 создате-

лям базы данных OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) за возможность использования параметров солнечного ветра, ММП и данных *ap*- и *AE*-индексов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории Борок ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 311–323. 2018.
<https://doi.org/10.7868/S001679401803001X>
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 208 с. 1973.
- 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 аэрономия. 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 // Доклады Академии наук 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 аэрономия. 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>
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли М., Биттерли Ж. Связь внезапных прекращений геомагнитных пульсаций *ipcl* в каспе с началом суббурь на ночной стороне // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 6. С. 58–65. 1998.
- 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 аэрономия. Т. 39. № 4. С. 29–38. 1999.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Довбня Б.В. Роль Vx-компоненты в генерации электромагнитного излуче-

- ния в диапазоне частот 0.01–1.0 Гц во время SC // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 4. С. 151–154. 1997.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Эффект прерывания серпентинной эмиссии (SE) в полярной шапке во время внезапных начал геомагнитных бурь (SSC) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 5. С. 617–626. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022040101>
- *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 // Вестник ОНЗ РАН. Т. 12. NZ4003. 2020. <https://doi.org/10.2205/2020NZ000366>
- *Потанов А.С., Гульельми А.В., Довбня Б.В.* Ультранизкочастотные эмиссии диапазона 0.1–3 Гц в приполярных областях // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 3. С. 48–55. 2020. <https://doi.org/10.12737/szf-63202006>
- *Прист Э.Р.* Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 592 с. 1985.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 271 с. 1976.
- *Семенова Н.В., Яхнин А.Г.* Резкое изменение резонансной структуры в спектре электромагнитного шума в герцовом диапазоне во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 3. С. 341–347. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0016794014030158>
- *Троицкая В.А., Матвеева Э.Т., Калишер А.Л.* Связь возбуждения геомагнитных пульсаций типов Pi1 и Pc1 с магнитосферными суббуриями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 13. № 4. С. 755–757. 1973.
- *Allen J.H., Abston C.C., Morris L.D.* Auroral electrojet magnetic activity indices AE (10) for 1966. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 37. Boulder, Colorado, 142 pp. 1974.
- *Allen J.H., Abston C.C., Morris L.D.* Auroral electrojet magnetic activity indices AE (11) for 1968. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 29. Boulder, Colorado, 144 pp. 1973.
- *Allen J.H.* Auroral electrojet magnetic activity indices AE for 1970. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 22. Boulder, Colorado, 146 c. 1972.
- *Allen J.H., Abston C.C., Morris L.D.* Auroral electrojet magnetic activity indices AE (11) for 1971. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 39. Boulder, Colorado, 146 pp. 1975.
- *Allen J.H., Abston C.C., Morris L.D.* Auroral electrojet magnetic activity indices AE (11) for 1972. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 45. Boulder, Colorado, 146 pp. 1975.
- *Allen J.H., Abston C.C., Morris L.D.* Auroral electrojet magnetic activity indices AE (11) for 1973. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 47. Boulder, Colorado, 146 pp. 1975.
- *Asheim S.* Serpentine emissions in the polar magnetic field. Report 83–38. Institute of Physics, University of Oslo, 8 pp. 1983.
- *Fraser-Smith A.C.* ULF/lower-ELF electromagnetic field measurements in the polar caps // Rev. Geophys. Space Phys. V. 20. № 3. P. 497–512. 1982. <https://doi.org/10.1029/RG020i003p00497>
- *Fu H., Yue C., Zong Q.-G., Zhou X.-Z., Fu S.* Statistical characteristics of substorms with different intensity // Journal of Geophysical Research: Space Physics. V. 126. e2021JA029318. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- *Guglielmi A., Potapov A., Dovbnya 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>
- *Hsu T.-S., McPherron R.L.* Average characteristics of triggered and nontriggered substorms // J. Geophys. Res. V. 109. A07208. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JA009933>
- *Morris R.J., Cole K.D.* “Serpentine emission” at the high latitude Antarctic station, Davis // Planet. Space Sci. V. 35. P. 313–328. 1987. <https://doi.org/10.1071/EG986015>
- *Parent A., Mann I.R., Rae J.* Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. V. 115. № A02312. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014673>
- *Russell C.T., McPherron R.L.* Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 78. № 1. P. 92–108. 1973. <https://doi.org/10.1029/ja078i001p00092>
- *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. N A8. P. 17.355–17.363. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA00400>
- *Tanskanen E.I.* A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined // J. Geophys. Res. V. 114. A05204. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013682>