

## УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭМИССИИ ДИАПАЗОНА 0.1–3 Гц В ПРИПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

### ULTRA LOW FREQUENCY EMISSIONS RANGING FROM 0.1 TO 3 Hz IN CIRCUMPOLAR AREAS

**А.С. Потапов**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

**А.В. Гульельми**

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru*

**Б.В. Довбня**

*Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН,  
Борок, Россия, dovbnia@inbox.ru*

**A.S. Potapov**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

**A.V. Guglielmi**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Irkutsk, Russia, guglielmi@mail.ru*

**B.V. Dovbnia**

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,  
Borok, Russia, dovbnia@inbox.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены характеристики двух типов излучений в высокочастотной части УНЧ-диапазона (0.1–3 Гц) — серпентинной эмиссии (SE) и дискретных диспергированных сигналов (DS). Они наблюдаются в полярных шапках с помощью индукционных магнитометров. Поскольку в настоящее время эти инструменты в высоких широтах практически отсутствуют, анализ проведен на основе записей 1968–1971 гг., полученных на близких к геомагнитным полюсам ст. «Восток» и «Туле». Показано, что появление DS жестко привязано к магнитной силовой линии, проходящей через станцию наблюдения, с острым пиком частоты появления в местный магнитный полдень. В то же время сезонный ход частоты появления DS имеет основной пик местным летом и дополнительный — местной зимой. С учетом полученного нами ранее результата о возбуждении DS в области форшока, можно предположить, что падающие на магнитопаузу волновые пакеты проникают на внешние силовые линии преимущественно в околополуденной области и распространяются вдоль этих линий в обе стороны, попадая в конце концов на поверхность земли в приполярных областях. В отличие от DS частота появления SE не имеет ни суточного, ни сезонного хода. Мы проверили и косвенно подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о возбуждении SE циклотронной неустойчивостью протонов в солнечном ветре, промоделировав вариации частоты ионноциклотронных волн при разных уровнях возмущенности межпланетной плазмы и сравнив результаты с наблюдавшимися в сходных условиях вариациями частоты SE. Сделан вывод о необходимости возобновления непрерывных наблюдений УНЧ-излучений с помощью индукционных магнитометров, установленных в полярных шапках вблизи проекций каспов и около геомагнитных полюсов.

**Ключевые слова:** ультранизкочастотные электромагнитные волны, полярные шапки, касп, магнитосфера, солнечный ветер.

**Abstract.** We examine the characteristics of oscillations of two types in the high-frequency edge of the ULF range (0.1–3 Hz), serpentine emission (SE), and discrete frequency dispersed signals (DS). Oscillations of both the types are observed in the polar caps exclusively with induction magnetometers. Since these instruments are currently practically absent at high latitudes, the analysis has been carried out from records obtained at the stations Vostok and Thule close to the geomagnetic poles in 1968–1971. The DS occurrence rate is shown to have a sharp peak at local magnetic noon. This fact indicates that DS emergence is rigidly tied to the geomagnetic field line passing through the observation station. At the same time, the seasonal variation in the frequency of DS occurrence has a main peak in local summer and an additional peak in local winter. We have revealed before that at least a part of DS is excited in the foreshock region. Taking this into account, we can assume that the wave packets incident to the magnetopause fall on the external field lines mainly in the noon region and propagate along these lines in both directions, eventually reaching Earth's surface in the polar regions. Unlike DS, the SE occurrence rate has neither a daily nor a seasonal variation. We have tested and confirmed indirectly the hypothesis put forward earlier about the excitation of SE by cyclotron instability of protons in the solar wind, simulating frequency variations in ion-cyclotron waves at different levels of interplanetary plasma perturbation and comparing the results with the SE frequency variations observed under similar conditions. We conclude that it is necessary to resume continuous observations of ULF emissions, using induction magnetometers installed in polar caps near the projections of cusps and near geomagnetic poles.

**Keywords:** ultra low frequency electromagnetic waves, polar caps, cusp, magnetosphere, solar wind.

## ВВЕДЕНИЕ

Спектр ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний в полярных шапках имеет свои характерные черты, обусловленные магнитосопреженностью приполярных областей с особыми структурными частями магнитосферы. Это, во-первых, доли геомагнитного хвоста, проецирующиеся в полярные шапки; во-вторых, полярные каспы и клефты с полуденной стороны полярной шапки (от  $\pm 65^\circ$  до  $70^\circ$  геомагнитной широты), где силовые линии, уходящие в хвост, граничат с линиями, соединяющимися с магнитошитом (каспы) или низкоширотным пограничным слоем (клефты) [Farrell, van Allen, 1990]. С этими структурами связаны процессы, влияющие на динамику магнитосферы: дневное магнитное пересоединение и прямое проникновение волновой турбулентности и плазмы из солнечного ветра (СВ) и магнитошита [Sauvaud et al., 1998; Berthomier et al., 2004; Moiseev et al., 2015], магнитные импульсы (МИЕ) и иррегулярные пульсации (IPCL) [Lanzerotti et al., 1991; Yahnin et al., 1995; Sibeck, Korotova, 1996; Manweiler et al., 2018; Kurazhkovskaya, Klain, 2017; Гульельми и др., 2017].

Колебания МИЕ и IPCL лежат в крайне низкочастотной части УНЧ-диапазона. Здесь же мы хотим обратить внимание на более высокочастотные эмиссии с несущей частотой от 0.1 до 2–3 Гц. Это дискретные частотно-диспергированные сигналы в диапазоне Pi1 и узкополосные непрерывные излучения с модулированной частотой, меняющейся в указанных выше пределах. Они могут регистрироваться только индукционными магнитометрами. Такие приборы, соединенные с аналоговыми магнитофонами для записи УНЧ-колебаний, устанавливались во время Международного геофизического года 1957–1958 гг. и работали, в том числе и в высокоширотных областях Земли, в 1960–1970 гг. К сожалению, в настоящее время они практически отсутствуют в полярных шапках; нет там и цифровых индукционных магнитометров. Поэтому мы будем пользоваться данными, полученными на ст. «Восток» (Антарктида) и «Туле» (Гренландия) в 1968–1972 гг. В таблице приведены географические и исправленные геомагнитные координаты этих станций, а также Северного и Южного геомагнитных полюсов на эпоху 1968 г. Заметим, что как «Восток», так и «Туле» были очень близки к Южному и Северному геомагнитным полюсам, находясь от них на расстояниях примерно  $6^\circ$  и  $4^\circ$  соответственно.

Данной публикацией мы хотим привлечь внимание исследователей к указанному классу УНЧ-излучений в диапазоне 0.1–3 Гц, наблюдавшихся в полярных шапках. Они не встречаются на более низких широтах и поэтому в отсутствие действующих индукционных магнитометров в полярных шапках в настоящее время их невозможно наблюдать. В то же время, как будет показано ниже, эти излучения несут полезную информацию о волновых процессах взаимодействия СВ с магнитным полем Земли и могут использоваться для получения новых знаний о внешних областях магнитосферы.

## ДИСКРЕТНЫЕ ЧАСТОТНО-ДИСПЕРГИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ

Время от времени в полярных шапках наблюдались импульсные сигналы типа Pi1, имеющие наклонный динамический спектр, пример которых показан на рис. 1. Наклон может быть как положительным, так и отрицательным. По всей видимости, он является следствием разной частотной дисперсии волн при их распространении, но здесь мы не будем останавливаться на этом вопросе и различать между собой подтипы сигналов с разными видами дисперсии.

Мы уже обращались к рассмотрению DS, наблюдавшихся в приполярных областях, в работе [Гульельми и др., 2019]. В ней мы выявили зависимость частоты появления сигналов от ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) в плоскости ХОZ. Наклон вектора ММП в вертикальной плоскости определяет расположение форшока (области повышенной волновой активности перед околоземным ударным фронтом) относительно магнитосферы. Было показано, что в южной полярной шапке вероятность наблюдения DS примерно в два раза выше при южном расположении форшока, чем при северном, что свидетельствует о внемагнитосферном происхождении, по крайней мере, части сигналов.

Анализ записей DS в полярных шапках был продолжен. Объем имеющегося у нас материала, записанного на ст. «Туле», оказался очень ограниченным, что не позволило получить на его основе надежных статистических результатов. Поэтому для данной части исследования мы ограничились данными, записанными на ст. «Восток». Была обнаружена еще одна интересная закономерность, тоже связанная с ориентацией магнитосферы относительно межпланетной среды. Дело в том, что суточный ход вероятности появления DS оказывается весьма четко выраженным (рис. 2). Но самое важное — то, что максимум частоты появления на ст. «Восток» падает на полдень по магнитному местному времени (MLT), которое отличается от географического местного времени примерно на 8 ч (см. таблицу и рис. 3). Это говорит о том, что на частоту появления DS влияют не местные условия станции (освещенность, состояние ионосферы и т. д.), а положение магнитной силовой линии, проходящей через станцию,

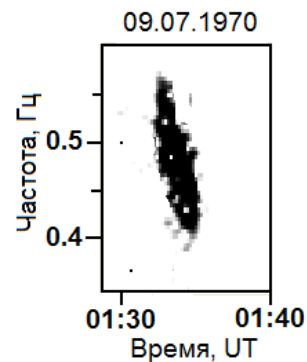


Рис. 1. Пример динамического спектра дискретного сигнала с отрицательным наклоном к оси времени, зарегистрированного на ст. «Восток» [Гульельми и др., 2019]

Координаты ст. «Туле» и «Восток» и геомагнитных полюсов на эпоху 1968 г.

Станция	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты		LT-UT	MLT-UT
«Туле»	76.5	291.3	85.8	34.1	-4.6	-2.8
«Восток»	-78.5	106.8	-83.5	52.6	7.1	-1.1
Северный геомагнитный полюс	80.2	279.8	90	-	-5.4	-
Южный геомагнитный полюс	-74.3	125.9	-90	-	8.4	-

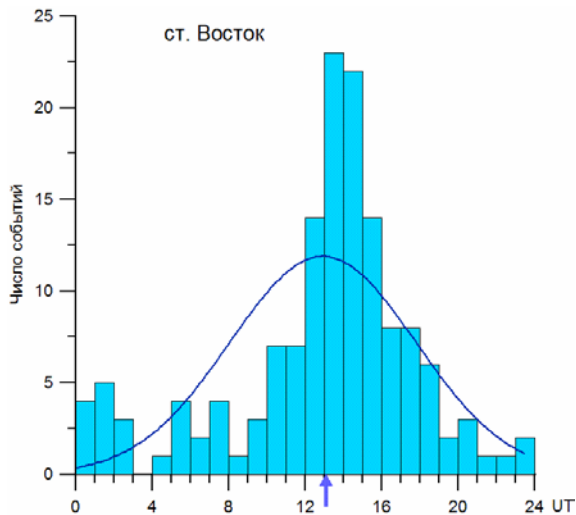


Рис. 2. Суточный ход частоты появления дискретных сигналов на ст. «Восток». Стрелкой указан местный полдень по геомагнитному (MLT) времени

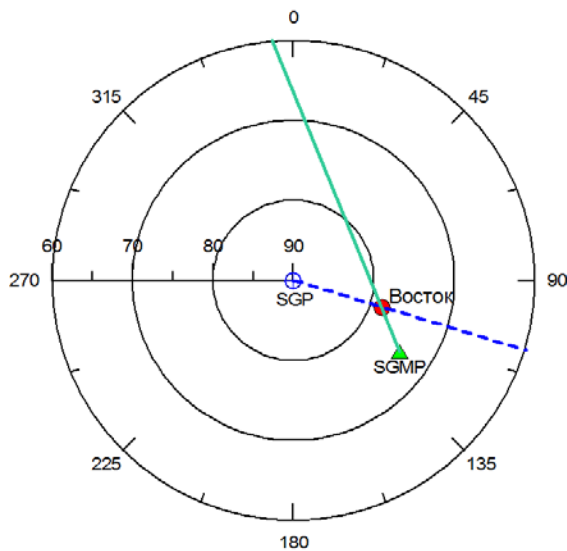


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая взаимное расположение ст. «Восток», Южного географического (SGP) и Южного геомагнитного (SGMP) полюса. Синей штриховой линией показан географический, а сплошной зеленой — геомагнитный меридиан ст. «Восток»

относительно полуденного меридиана. При этом наилучшие условия для наблюдения DS создаются, когда эта силовая линия обращена к Солнцу. Это может быть связано с тем, что возбуждаемые в форшоке или на границе магнитосферы УНЧ-импульсы, попадая на внешние силовые линии геомагнитного поля, «соскальзывают» по ним в каспы, являющиеся аттракторами для падающих из СВ на магнитопаузу

волн [Гульельми и др., 2017]. В магнитный полдень ось магнитного диполя и воронка южного каспа сильнее всего наклонены навстречу СВ, особенно в ноябре–январе. Поэтому именно часы вокруг магнитного полудня оказываются наиболее подходящими для проникновения DS на земную поверхность.

Посмотрим, как вероятность наблюдения DS зависит от сезона. На рис. 4 показан сезонный ход частоты появления дискретных сигналов на ст. «Восток» в 1966–1969 гг. По горизонтальной оси нанесен параметр  $\sin\phi$ , где  $\phi$  — долгота Солнца в эклиптических координатах:  $\sin\phi=0$  в точках весеннего и осеннего равноденствий,  $\sin\phi=\pm 1$  в точках летнего (+) и зимнего (-) солнцестояний. Как и ожидалось, наиболее вероятно появление DS на ст. «Восток» в летние для Южного полушария месяцы. Почти половина (46 %) событий DS наблюдалась в период с 24 октября по 17 февраля ( $\sin\phi < -0.5$ ). Но на графике есть и второй пик, причем соответствующий прямо противоположным условиям — зиме Южного полушария. Он намного ниже основного, но все же в 24 % случаев DS наблюдались с 23 апреля по 20 августа, когда  $\sin\phi > 0.5$ . На наш взгляд, это могло быть связано с DS, попадавшими в северный касп — для них это были наиболее благоприятные условия. Часть из них могла одновременно проникать и в южный касп и наблюдаться на ст. «Восток», например, отразившись от ионосферы и пройдя вдоль последней замкнутой силовой линии, связывающей два каспа. Однако длина пути от подсолнечной точки до земли для таких сигналов была больше, поэтому они сильнее затухали и лишь наиболее мощные достигали станции.

### СЕРПЕНТИННАЯ ЭМИССИЯ

Другим типом колебаний, наблюдавшихся с помощью индукционных магнитометров исключительно в полярных шапках, является серпентинная эмиссия. Она была обнаружена на магнитофонных записях осцилляций магнитного поля ст. «Восток» в первой половине 1970-х гг. [Гульельми, Довбня, 1973, 1974; Guglielmi, Dovbnya, 1974]. Это была узкополосная эмиссия с частотой, меняющейся в диапазоне 0.1–3 Гц, длящаяся иногда несколько часов или даже суток. Сезонной и суточной зависимости частоты появления или других характеристик SE не выявлено. Модуляция частоты эмиссии имеет непрерывный характер с периодами от нескольких минут до часа. Наиболее часто встречающийся период изменения частоты составляет 5 мин. Кроме ст. «Восток», SE наблюдалась на другой антарктиче-

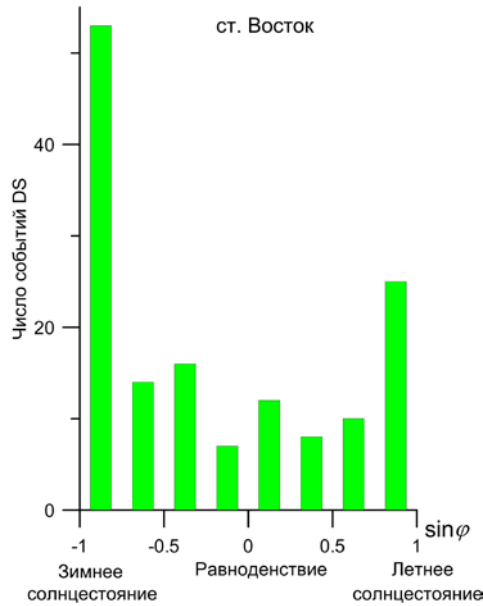


Рис. 4. Сезонный ход частоты появления дискретных сигналов на ст. «Восток». По горизонтальной оси отложены значения  $\sin \varphi$  — долготы Солнца, отсчитываемой от точки весеннего равноденствия

ской станции «Дэвис» [Morris, Cole, 1987], а также в Арктике [Asheim, 1983]. Сразу же после обнаружения SE авторами была дана интерпретация ее происхождения [Гульельми, Довбня, 1973]. Согласно предложенной гипотезе, излучение генерируется в межпланетной среде в виде ионно-циклотронных волн (ИЦВ) за счет неустойчивости протонов солнечного ветра. Новый импульс к изучению эмиссии был получен несколько лет назад, когда было высказано предположение о том, что основным источником частотной модуляции SE являются волны от Солнца [Guglielmi et al., 2015; Довбня и др., 2017]. Кроме 5-минутного периода, характерного как для модуляции частоты SE, так и для колебаний Солнца, были выявлены и другие периоды, наблюдающиеся и в спектре частотной модуляции SE, и в спектре наблюдаемых на Солнце осцилляций [Довбня, Потапов, 2018].

Хотя к настоящему времени имеются уже прямые спутниковые измерения ИЦВ в СВ [Jian et al., 2009, 2010; Zhao et al., 2017], до сих пор нет прямых доказательств межпланетного происхождения SE, поскольку измерения с высоким разрешением магнитного поля и плазмы в космосе начались уже после завершения работы индукционных магнитометров в полярных шапках. Поэтому невозможно сравнить характеристики (частоту, период и характер частотной модуляции) наблюдавшихся на ст. «Восток» и «Туле» событий SE с параметрами СВ и ММП или с наблюдавшимися в межпланетной среде волнами. Есть, однако, другая возможность — промоделировать предполагаемое поведение частоты эмиссии в современную эпоху, используя имеющиеся представления о механизме возбуждения SE и прямые измерения с достаточно высоким разрешением параметров ММП и плазмы СВ.

Наиболее детальный анализ возбуждения эмиссии был выполнен в работе [Guglielmi, Potapov, 2017]. Физически механизм генерации SE заключа-

ется в следующем. Распределение протонов с температурной анизотропией становится неустойчивым относительно возбуждения ИЦВ, распространяющихся вдоль силовых линий ММП. Скорость распространения ИЦВ намного меньше скорости СВ, поэтому волны сносятся потоком. Для неподвижного наблюдателя, находящегося на космическом аппарате или на Земле, круговая частота ИЦВ  $\omega$  вследствие эффекта Доплера равна

$$\omega = \omega_{\text{SW}} + \mathbf{k} \mathbf{U}_{\text{SW}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{SW}}$  — частота волны в сопутствующей системе координат;  $\mathbf{k}$  — волновой вектор;  $\mathbf{U}_{\text{SW}}$  — вектор скорости СВ. Анализ, проделанный в [Guglielmi, Potapov, 2017], показал, что инкремент ионно-циклотронной неустойчивости имеет довольно острый максимум в случае продольного распространения волн, когда волновой вектор направлен вдоль магнитного поля  $\mathbf{B}$  и равен примерно

$$k_{\text{max}} = k_{\parallel} \approx \omega_{\text{op}} / c,$$

где  $\omega_{\text{op}} = \sqrt{4\pi e^2 N_p / m_p}$  — плазменная частота протонов;  $c$  — скорость света;  $e$  — элементарный заряд;  $m_p$  и  $N_p$  — масса и концентрация протонов в плазме СВ. Кроме того, численные оценки показывают, что в типичных условиях

$$\omega_{\text{SW}} \approx \Omega_p,$$

где  $\Omega_p = eB / (m_p c)$  — циклотронная частота протонов. Подставляя численные значения, получаем для несущей частоты SE следующее выражение:

$$f_{\text{SE}} = \omega / (2\pi) \approx 7 \cdot 10^{-4} U_{\text{SW}} N_p^{1/2} |\cos \psi| + 0.015B, \quad (2)$$

где  $\psi$  — угол между скоростью СВ и вектором ММП, скорость измеряется в км/с, концентрация — в  $\text{см}^{-3}$ , магнитное поле — в нТл. Видно, что частота эмиссии определяется довольно сложной комбинацией скорости СВ  $U$ , плотности протонов  $N_p$ , напряженности ММП  $B$  и взаимным расположением векторов  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{B}$ . Теперь, используя (2), мы можем моделировать поведение частоты предполагаемой SE в различных условиях межпланетной среды на орбите Земли.

Мы подобрали два события SE по наблюдениям на ст. «Восток» в 1971 г. длительностью несколько часов, во время которых, судя по имеющимся в базе OMNI среднечасовым значениям плазмы и ММП перед фронтом околосолнечной ударной волны, были сильно отличающиеся уровни возмущенности СВ. Перед земной магнитосферой 8 мая 1971 г. преобладали возмущенные условия: скорость СВ в 13–24 UT падала примерно от 620 до 580 км/с при низкой плотности протонов около  $2.5 \text{ см}^{-3}$  и средней напряженности ММП около 3.6 нТл. Напротив, во второй половине суток 13 июля 1971 г. скорость СВ была средней (~430 км/с), а напряженность ММП (6.2 нТл) и плотность протонов ( $8.5 \text{ см}^{-3}$ ) были несколько повышенными. На рис. 5, а, в показаны динамические спектры SE для этих временных интервалов. Как видно, поведение частоты эмиссии довольно значительно отличается: для 13 июля 1971 г. характерны спокойные длиннопериодные вариации,

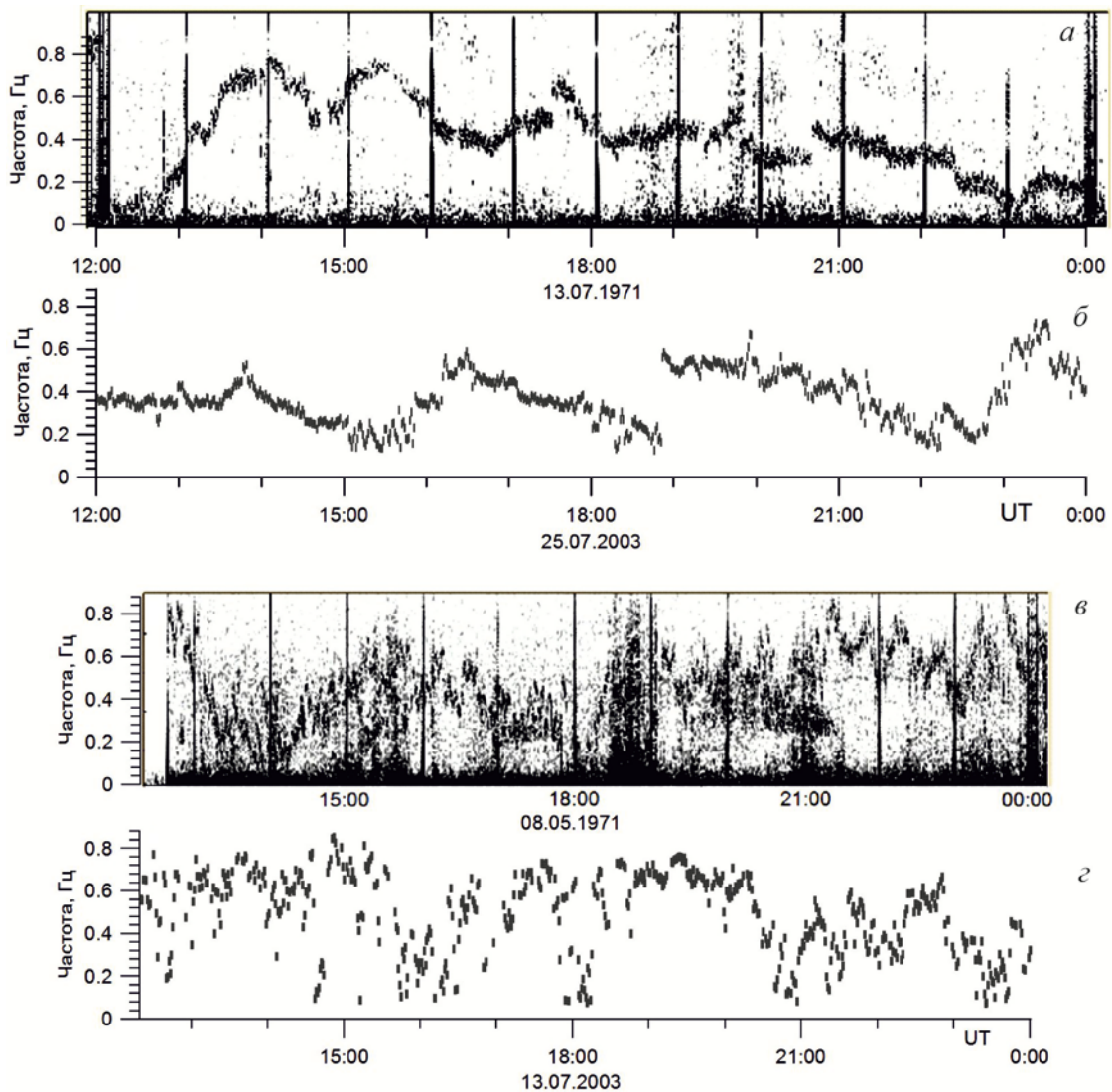


Рис. 5. Две пары динамических спектров серпентинной эмиссии, где верхняя пара соответствует спокойным условиям в СВ, нижняя — возмущенным: *a, в* — по измерениям на ст. «Восток»; *б, г* — результат моделирования по (2) вариаций частоты ИЦВ, возбуждаемых в СВ. Средние значения параметров:  $U_{SW}=438$  км/с,  $B=6.2$  нТл,  $N_p=8.4$  см<sup>-3</sup> (*a*);  $U_{SW}=317$  км/с,  $B=9.0$  нТл,  $N_p=13.5$  см<sup>-3</sup> (*б*);  $U_{SW}=603$  км/с,  $B=3.6$  нТл,  $N_p=2.4$  см<sup>-3</sup> (*в*);  $U_{SW}=548$  км/с,  $B=4.7$  нТл,  $N_p=3.2$  см<sup>-3</sup> (*г*)

в то время как 8 мая 1971 г. наблюдаются хаотические скачки и, хотя вариации больших периодов тоже имеются, но быстрые иррегулярные осцилляции по амплитуде сравнимы с длиннопериодными осцилляциями. Ниже, на рис. 5, *б, г* показаны смоделированные вариации  $f_{SE}$ , построенные с использованием выражения (2), по данным 2003 г. с минутным разрешением, заимствованные в базе OMNI высокого разрешения [[https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html)]. Выбраны интервалы, в которых средние условия перед околоземным ударным фронтом были близки к тем, которые имели место во время отобранных интервалов 1971 г. Основные параметры ММП и плазмы указаны в подписи к рисунку. Мы видим явное соответствие характера вариаций частоты, наблюдавшихся в 1971 г. и смоделированных по данным 2003 г. для разных условий в СВ.

Кроме записей индукционного магнитометра со ст. «Восток», в нашем распоряжении оказался очень ограниченный объем данных, записанных с помощью идентичной аппаратуры на ст. «Туле». Среди них было несколько отрывков, содержащих записи

серпентиной эмиссии, сделанные одновременно с регистрацией SE на ст. «Восток». Один из таких отрывков показан на рис. 6, *a, б*). Заметно общее соответствие вариаций частоты SE на обеих станциях, но детали этих вариаций отличаются. Различия могут быть связаны с разном в пространстве областей проникновения волн в магнитосферу и далее на земную поверхность.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

УНЧ-излучения двух рассмотренных типов — дискретные сигналы и серпентинная эмиссия — наблюдаются в полярных шапках, но имеют разную морфологию и, очевидно, разные источники. Частота появления DS имеет острый максимум появления местным летом в местный магнитный полдень, когда проходящая через станцию наблюдения магнитная силовая линия обращена навстречу солнечному ветру, а ось магнитного диполя Земли максимально наклонена к Солнцу. Вторичный сезонный максимум наблюдается местной зимой, когда в наиболее благо-

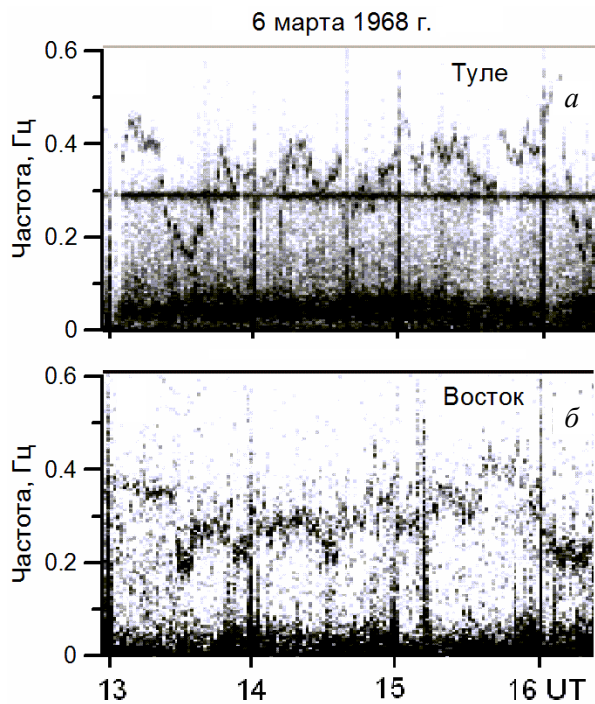


Рис. 6. Динамические спектры излучений SE, наблюдавшихся одновременно в северной (а) и южной (б) полярных шапках

приятных условиях оказывается противоположная полярная шапка. К тому же, как было показано ранее [Гульельми и др., 2019], частота появления DS зависит еще и от наклона вектора ММП в вертикальной плоскости (но не от знака  $B_z$ -компоненты), определяющего ориентацию форшока. Поэтому есть основания предположить, что сигналы зарождаются в форшоке или даже перед ним в СВ и при благоприятном относительном положении вектора ММП, проходящей через станцию наблюдения силовой линии и наклоне магнитного диполя проникают на поверхность Земли. Таким образом, в случае DS свидетельством связи этих сигналов с межпланетной средой является зависимость частоты их появления от ориентации ММП и магнитного поля Земли.

Совсем другая ситуация складывается с серпентинной эмиссией. Ее связь с межпланетной средой проявляется в модуляции частоты излучения SE, основной вклад в которую вносят вариации направления ММП. Что касается условий ее проникновения на земную поверхность, этот вопрос остается пока открытым. Серпентинная эмиссия — это квазинепрерывное излучение, поэтому корректный поиск суточного и/или сезонного хода требует исследования соответствующих вариаций амплитуды, а не частоты появления SE. Однако это пока невозможно на основе имеющегося материала — разрозненных спектрограмм, на которых амплитуда излучения отражается лишь в виде почернения. Из общих соображений можно было бы высказать гипотезу о проникновении SE из СВ в доли хвоста и оттуда в полярные шапки. Но надо помнить, что эта эмиссия наблюдалась в основном вблизи геомагнитных полюсов (обсерватории «Туле» и «Восток» располагались почти точно на их месте в 1960–1970-х гг.) На обсерватории «Мирный», находящейся в юж-

ной полярной шапке, излучение SE никогда не наблюдалось.

В целом результаты анализа показывают информационную ценность УНЧ-излучений с частотой выше 0.1 Гц, наблюдаемых в полярных шапках вблизи геомагнитных полюсов и проекций магнитосферных каспов. Отсутствие современных средств наблюдения таких излучений в настоящее время является, на наш взгляд, существенным пробелом в организации высокоширотных геофизических исследований. Возобновление наблюдений в приполярных областях с помощью индукционных магнитометров на современной аппаратурной базе позволит получить важную дополнительную информацию о взаимодействии внешней дневной области магнитосферы с ММП и плазменными потоками СВ.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 ИСЗФ СО РАН, а также программы государственных заданий ИФЗ РАН (№ 0144-2014-00116) при частичной финансовой поддержке грантом РФФИ 19-05-00574 и Программой № 28 Президиума РАН. Мы благодарны руководителям проектов ACE и Wind, а также организаторам ресурсов OMNI [[https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html); <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>; [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public)] за предоставление открытого доступа к результатам спутниковых измерений параметров СВ и ММП. Авторы признательны Б.И. Клайну и Т.Н. Полюшкиной за обсуждение работы в процессе ее выполнения и полученных результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гульельми А.В., Довбня Б.В. Гидромагнитное излучение межпланетной плазмы // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, № 10. С. 601–604.
- Гульельми А.В., Довбня Б.В. Наблюдение геомагнитных пульсаций в диапазоне 0–2 Гц с глубокой модуляцией несущей частоты в полярной шапке // Геомагнетизм и аэронаука. 1974. Т. 14, № 5. С. 868–870.
- Гульельми А.В., Клайн Б.И., Потапов А.С. Северно-южная асимметрия ультранизкочастотных колебаний электромагнитного поля Земли // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 4. С. 27–33. DOI: [10.12737/szf-34201703](https://doi.org/10.12737/szf-34201703).
- Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В. Влияние ориентации ММП на северно-южную асимметрию УНЧ-волновых пакетов в полярных шапках // Геофиз. иссл. 2019. Т. 20, № 2. С. 19–27. DOI: [10.21455/gr2019.2.2](https://doi.org/10.21455/gr2019.2.2).
- Довбня Б.В., Потапов А.С. Исследование частотной модуляции серпентинной эмиссии // Физика Земли. 2018. № 5. С. 19–26. DOI: [10.1134/S000233718050058](https://doi.org/10.1134/S000233718050058).
- 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. 2017. Т. 3, № 1. С. 59–62. DOI: [10.12737/23043](https://doi.org/10.12737/23043).
- Asheim S. Serpentine emissions in the polar magnetic field. Oslo. 1983. 8 p. (Rep. ser. No. 83–38 / Inst. of Physics).
- Berthomier M., Cornilleau-Wehrin N., Fontaine D., et al. CLUSTER-II observations of mid-altitude polar cleft turbulence // American Geophysical Union, Fall Meeting 2004, abstract id.SM51C-0394.
- Farrell W.M., van Allen J.A. Observations of the Earth's polar cleft at large radial distances with the Hawkeye-1 Magnetometer // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N A12. P. 20945–20958.
- Guglielmi A.V., Dovbnya B.V. Hydromagnetic emission of the interplanetary plasma // Astrophys. Space Sci. 1974. V. 31. P. 11–29.

Guglielmi A.V., Potapov A.S. Propagation of guided waves in moving media with application to the theory of small-scale electromagnetic waves in the solar wind plasma. *IEEE Xplore Digital Library / 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. 2017. P. 1051–1054.

Guglielmi A., Potapov A., Dovbnya B. Five-minute solar oscillations and ion-cyclotron waves in the solar wind // *Solar Phys.* 2015. V. 290, N 10. P. 3023–3032. DOI: [10.1007/s11207-015-0772-2](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0772-2).

Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G., et al. Ion cyclotron waves in the solar wind observed by STEREO near 1 AU // *The Astrophys. J. Lett.* 2009. V. 701, iss. 2. P. L105–L109. DOI: [10.1088/0004-637X/701/2/L105](https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/L105).

Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G., et al. Observations of ion cyclotron waves in the solar wind near 0.3 AU // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. A12115. DOI: [10.1029/2010JA015737](https://doi.org/10.1029/2010JA015737).

Kurzhkovskaya N.A., Klain B.I. Isolated bursts of irregular geomagnetic pulsations in the region of the dayside cusp // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017. V. 57, N 5. P. 566–578. DOI: [10.1134/S0016793217040119](https://doi.org/10.1134/S0016793217040119).

Lanzerotti L.J., MacLennan C.G., Konik R.M., et al. Cusp latitude magnetic impulse events. 1. Occurrence statistics // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, N A8. P. 14009–14022.

Manweiler J., Engebretson M., Connors M. February 2, 2017 observation of magnetic impulsive event (MIE) by AUTUMNX and Van Allen Probes // 42<sup>nd</sup> COSPAR Scientific Assembly. July 14–22, 2018, Pasadena, California, USA. Abstract id. C1.3-22-18.

Moiseev A.V., Baishev D.G., Barkova E.S., et al. Specific features of the generation of long-periodic geomagnetic pulsations in the event on June 25, 2008 // *Cosmic Res.* 2015. V. 53, N 2. P. 111–118. DOI: [10.1134/S0010952515020057](https://doi.org/10.1134/S0010952515020057).

Morris R.J., Cole K.D. “Serpentine emission” at the high latitude Antarctic station Davis // *Planet. Space Sci.* 1987. V. 35. P. 313–328.

Sauvaud J.A., Barthe H., Aoustin C., et al. The ion experiment onboard the Interball-Aurora satellite; initial results on velocity-dispersed structures in the cleft and inside the auroal oval // *Ann. Geophys.* 1998. V. 16, N 9. P. 1056–1069. DOI: [10.1007/s00585-998-1056-z](https://doi.org/10.1007/s00585-998-1056-z).

Sibeck D.G., Korotova G.I. Occurrence patterns for transient magnetic field signatures at high latitudes // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 96, N A6. P. 13413–13428. DOI: [10.1029/96JA00187](https://doi.org/10.1029/96JA00187).

Yahnin A., Titova E., Lubchich A., et al. Dayside high latitude magnetic impulsive events: their characteristics and relationship to sudden impulses // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. V. 57. P. 1569–1582.

Zhao G.Q., Feng H.Q., Wu D.J., et al. Time-dependent occurrence rate of electromagnetic cyclotron waves in the solar wind: Evidence for the effect of alpha particles? // *Astrophys. J. Lett.* 2017. V. 847, iss. 1. Article id. L8. 4 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aa88b3](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa88b3).

URL: [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html) (дата обращения 8 мая 2020 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (дата обращения 8 мая 2020 г.).

URL: [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public) (дата обращения 8 мая 2020 г.).

## REFERENCES

Asheim S. *Serpentine emissions in the polar magnetic field*. Oslo. 1983. 8 p. (Rep. ser. No. 83–38 / Inst. of Physics).

Berthomier M., Cornilleau-Wehrin N., Fontaine D., Robert P., Canu P., Bouhram M., André M. CLUSTER-II observations of mid-altitude polar cleft turbulence. *American Geophysical Union, Fall Meeting*. 2004, Abstract id.SM51C-0394.

Dovbnya B.V., Potapov A.S. The frequency modulation of serpentine emission as compared to the set of the known periodicities of solar oscillations. *Izvestiya, Physics of the Solid*

*Earth*. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 680–687. DOI: [10.1134/S106931318050051](https://doi.org/10.1134/S106931318050051).

Dovbnya B.V., Klain B.I., Guglielmi A.V., Potapov A.S. Spectrum of frequency modulation of serpentine emission as a reflection of the solar fluctuation spectrum. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 1, pp. 73–77. DOI: [10.12737/article\\_58fd6dfaa04833.19557687](https://doi.org/10.12737/article_58fd6dfaa04833.19557687).

Farrell W.M., van Allen J.A. Observations of the Earth’s polar cleft at large radial distances with the Hawkeye-1 Magnetometer. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, no. A12, pp. 20945–20958.

Guglielmi A.V., Dovbnya B.V. Hydromagnetic emission of interplanetary plasma. *Pisma v ZhETF [JETP Lett.]*. 1973, vol. 18, no. 10, pp. 601–604. (In Russian).

Guglielmi A.V., Dovbnya B.V. Hydromagnetic emission of the interplanetary plasma. *Astrophys. Space Sci.* 1974, vol. 31, pp. 11–29.

Guglielmi A.V., Dovbnya B.V. Observation of geomagnetic pulsations in the band 0–2 Hz with deep modulation of carrier frequency in polar cap. *Geomagnetizm i aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]*. 1974, vol. 14, no. 5, pp. 868–870. (In Russian).

Guglielmi A.V., Potapov A.S. Propagation of guided waves in moving media with application to the theory of small-scale electromagnetic waves in the solar wind plasma. *IEEE Xplore Digital Library / 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. 2017, pp. 1051–1054.

Guglielmi A., Potapov A., Dovbnya B. Five-minute solar oscillations and ion-cyclotron waves in the solar wind. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, no. 10, pp. 3023–3032. DOI: [10.1007/s11207-015-0772-2](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0772-2).

Guglielmi A.V., Potapov A.S., Dovbnya B.V. Influence of the interplanetary magnetic field orientation on north-southern asymmetry of ULF wave packets in the polar caps. *Geofizicheskie issledovaniya [Geophys. Res.]* 2019, vol. 20, no. 2, pp. 19–27. DOI: [10.21455/gr2019-2-2](https://doi.org/10.21455/gr2019-2-2). (In Russian).

Guglielmi A.V., Klain B.I., Potapov A.S. North-south asymmetry of ultra-low-frequency oscillations of Earth’s electromagnetic field. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 4, pp. 26–31. DOI: [10.12737/stp-34201703](https://doi.org/10.12737/stp-34201703).

Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G., Strangeway R.J., Leisner J.S., Galvin A.B. Ion cyclotron waves in the solar wind observed by STEREO near 1 AU. *Astrophys. J.* 2009, vol. 701, iss. 2, pp. L105–L109. DOI: [10.1088/0004-637X/701/2/L105](https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/L105).

Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G., Anderson B.J., Boardsen S.A., Strangeway R.J., Cowee M.M., Wennmacher A. Observations of ion cyclotron waves in the solar wind near 0.3 AU. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, p. A12115. DOI: [10.1029/2010JA015737](https://doi.org/10.1029/2010JA015737).

Kurzhkovskaya N.A., Klain B.I. Isolated bursts of irregular geomagnetic pulsations in the region of the dayside cusp. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017, vol. 57, no. 5, pp. 566–578. DOI: [10.1134/S0016793217040119](https://doi.org/10.1134/S0016793217040119).

Lanzerotti L.J., MacLennan C.G., Konik R.M., Wolfe A., Venkatesan D. Cusp latitude magnetic impulse events. 1. Occurrence statistics. *J. Geophys. Res.* 1991, vol. 96, no. A8, pp. 14009–14022.

Manweiler J., Engebretson M., Connors M. February 2, 2017 observation of magnetic impulsive event (MIE) by AUTUMNX and van Allen Probes. 42<sup>nd</sup> COSPAR Scientific Assembly. Held 14–22 July 2018, in Pasadena, California, USA, Abstract id. C1.3-22-18.

Moiseev A.V., Baishev D.G., Barkova E.S., Du A., Yumoto K. Specific features of the generation of long-periodic geomagnetic pulsations in the event on June 25, 2008. *Cosmic Res.* 2015, vol. 53, no. 2, pp. 111–118. DOI: [10.1134/S0010952515020057](https://doi.org/10.1134/S0010952515020057).

Morris R.J., Cole K.D. “Serpentine emission” at the high latitude Antarctic station Davis. *Planet. Space Sci.* 1987, vol. 35, pp. 313–328.

Sauvaud J.A., Barthe H., Aoustin C., Thocaven J.J., Rouzaud J., Penou E., et al. The ion experiment onboard the Interball-Aurora satellite; initial results on velocity-dispersed structures in the cleft and inside the auroral oval. *Ann. Geophys.* 1998, vol. 16, no. 9, pp. 1056–1069. DOI: [10.1007/s00585-998-1056-z](https://doi.org/10.1007/s00585-998-1056-z).

Sibeck D.G., Korotova G.I. Occurrence patterns for transient magnetic field signatures at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 96, no. A6, pp. 13413–13428. DOI: [10.1029/96JA00187](https://doi.org/10.1029/96JA00187).

Yahnin A., Titova E., Lubchich A., Bosinger T., Manninen J., Turunen T., Hansen T., Troshichev O., Kotikov A. Dayside high latitude magnetic impulsive events: their characteristics and relationship to sudden impulses. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995, vol. 57, pp. 1569–1582.

Zhao G.Q., Feng H.Q., Wu D.J., Chu Y.H., Huang J. Time-dependent occurrence rate of electromagnetic cyclotron waves in the solar wind: Evidence for the effect of alpha particles? *Astrophys. J. Lett.* 2017, vol. 847, iss. 1, article id. L8, 4 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aa88b3](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa88b3).

URL: [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html) (accessed 8 May 2020).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (accessed 8 May 2020).

URL: [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public) (accessed 8 May 2020).

*Как цитировать эту статью:*

Потапов А.С., Гульельми А.В., Довбня Б.В. Ультранизкочастотные эмиссии диапазона 0.1–3 Гц в приполярных областях. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 3. С. 48–55. DOI: [10.12737/szf-63202006](https://doi.org/10.12737/szf-63202006).