

**УЗКОПОЛОСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ОТ 0.5 ДО 3.5 Гц
ЧАСТОТОЙ НА ФОНЕ ГЛАВНОЙ ФАЗЫ МАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2013 г.****NARROW-BAND EMISSION WITH 0.5 TO 3.5 Hz VARYING FREQUENCY
IN THE BACKGROUND OF THE MAIN PHASE OF THE 17 MARCH 2013
MAGNETIC STORM****А.С. Потапов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru***Б.В. Довбня***Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН,
Ярославская область, Россия, dovbnia@inbox.ru***Д.Г. Баишев***Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г. Шафера СО РАН
Якутск, Россия, baishev@ikfia.ysn.ru***Т.Н. Полюшкينا***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, tnp@iszf.irk.ru***Р.А. Рахматулин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, rav@iszf.irk.ru***A.S. Potapov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru***B.V. Dovbnya***Borok Geophysical Observatory of IPhE RAS,
Yaroslavl Region, Russia, dovbnia@inbox.ru***D.G. Baishev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, baishev@ikfia.sbras.ru***T.N. Polyushkina***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, tnp@iszf.irk.ru***R.A. Rakhmatulin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, rav@iszf.irk.ru*

Аннотация. Представлены результаты анализа узкополосного излучения в диапазоне Pc1 с возрастающей несущей частотой, продолжавшегося необычайно длительное время — около 9 ч. Явление наблюдалось на фоне главной фазы сильной магнитной бури, вызванной приходом головной ударной волны, предшествовавшей высокоскоростному потоку солнечного ветра, и длительным интервалом отрицательных значений вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля. Событие имело локальный характер, проявляясь лишь на трех станциях, находящихся в интервале географических долгот $\lambda=100\text{--}130^\circ$ E и магнитных оболочек $L=2.2\text{--}3.4$. Несущая частота сигнала возрастала в ступенчатом режиме от 0.5 до 3.5 Гц. Предложена интерпретация данного явления на основе стандартной модели генерации ионно-циклотронных волн в магнитосфере за счет их резонансного взаимодействия с потоками ионов умеренных энергий. Предполагается, что непрерывный сдвиг области генерации, располагающейся во внешней области плазматосферы, на меньшие L -оболочки способен объяснить как локальность явления, так и диапазон повышения частоты. Узкая полоса излучения обязана своим образованием так называемым носовым структурам в энергетическом спектре потоков ионов, внедряющимся из геомагнитного хвоста в магнитосферу. Составлен один из вариантов сценария развития процессов, приводящих к генерации наблюдавшегося излучения, с указанием конкретных значений положения области генерации, плотности плазмы, магнитного поля и энергии резонансных протонов. Обсуждаются морфологические отличия рассмотренного излучения от известных типов геомагнитных пульсаций и причины, приведшие к столь необычному явлению.

Ключевые слова: геомагнитные пульсации, ионно-циклотронные волны, плазмпause, потоки ионов, магнитная буря, межпланетное магнитное поле, высокоскоростной поток солнечного ветра.

Abstract. We present results of the analysis of an unusually long narrow-band emission in the Pc1 range with increasing carrier frequency. The event was observed against the background of the main phase of a strong magnetic storm caused by arrival of a high-speed solar wind stream with a shock wave in the stream head and a long interval of negative vertical component of the interplanetary magnetic field. Emission of approximately 9-hour duration had a local character, appearing only at three stations located in the range of geographical longitude $\lambda=100\text{--}130^\circ$ E and magnetic shells $L=2.2\text{--}3.4$. The signal carrier frequency grew in a stepped mode from 0.5 to 3.5 Hz. We propose an emission interpretation based on the standard model of the generation of ion cyclotron waves in the magnetosphere due to the resonant wave-particle interaction with ion fluxes of moderate energies. We suppose that a continuous shift of the generation region, located in the outer area of the plasmasphere, to smaller L -shell is able to explain both the phenomenon locality and the range of the frequency increase. A narrow emission frequency band is associated with the formation of nose-like structures in the energy spectrum of the ion fluxes penetrating from the geomagnetic tail into magnetosphere. We offer a possible speculative scenario of the processes leading to the generation of the observed emission. The scenario contains specific values of the generation region position, plasma density, magnetic field, and resonant proton energies. We discuss morphological differences of the emissions considered from known types of geomagnetic pulsations, and reasons for the occurrence of this unusual event.

Keywords: geomagnetic pulsations, ion cyclotron waves, plasmopause, ion flux, magnetic storm, interplanetary magnetic field, high-speed stream, solar wind.

ВВЕДЕНИЕ

Частотный диапазон 0.2–5 Гц устойчивых регулярных колебаний (Pc1 согласно классификации геомагнитных пульсаций [Гульельми, Троицкая, 1973]) представлен в магнитосфере Земли одним основным видом колебаний, структурированный подвид которых наиболее известен как «жемчужины». Другими подвидами, частота которых хотя бы частично попадает в этот диапазон, являются излучения ионосферного альвеновского резонатора и серпентинная эмиссия, но первые многополосны и занимают более широкий диапазон, вплоть до 8 Гц [Полюшкина и др., 2015], а вторые наблюдаются только в полярных шапках [Гульельми, Довбня, 1973]. И наземные, и спутниковые наблюдения Pc1 показывают, что кроме структурированных жемчужин часто регистрируются неструктурированные излучения в этом же диапазоне, в основном узкополосные. Считается, что и те, и другие возбуждаются в магнитосфере в виде ионно-циклотронных волн (ИЦВ) за счет кинетической неустойчивости потоков ионов средних энергий (3–300 кэВ) [Cornwall, 1965]. Интерес к исследованию Pc1 вполне объясним, если принять во внимание важную роль, которую играют эти пульсации в системе солнечно-земных связей [Guglielmi, Kangas, 2007]. Они чутко реагируют на изменения в динамике и структуре магнитосферы. Излучения эти обладают большим диагностическим потенциалом, позволяя судить по своим характеристикам о различных процессах, протекающих в магнитосфере, получать численные оценки ключевых параметров среды [Гульельми и др., 1972; Матвеева и др., 1972; Гульельми, Троицкая, 1973; Mursula et al., 1999]. В основном это касается жемчужин, наблюдающихся главным образом в спокойные и умеренно возмущенные периоды. Однако значительный интерес при исследовании представляют периоды сильных магнитных возмущений, когда происходит заметная деформация и перестройка всех структурных образований в магнитосфере. Ниже мы будем рассматривать конкретное событие излучения в диапазоне Pc1 именно на фоне сильной магнитосферной бури, начавшейся в 06 UT 17 марта 2013 г. Событие это необычно как своей 9-часовой длительностью, так и исключительно высокой нестационарностью частоты, меняющейся в ходе события почти на три октавы — от 0.5 до 3.5 Гц. Целью работы является интерпретация столь необычного явления на основе сопоставления его свойств с динамикой развития возмущения в ночной магнитосфере. Мы надеемся, что выявленные закономерности на основе этого *case study* позволят лучше понять явления, приводящие к генерации ИЦВ во время сильных возмущений, и прольют свет на связь поведения возбуждаемых колебаний с протекающими в магнитосфере плазменными процессами.

НАБЛЮДЕНИЯ

17 марта 2013 г. в 06 UT земная магнитосфера была атакована фронтом межпланетной ударной

волны, вслед за которым последовал высокоскоростной поток солнечного ветра. Развитие возмущения можно проследить по вариациям основных геомагнитных индексов и межпланетного электрического поля E , показанным на рис. 1 (эти и последующие данные о состоянии межпланетных электрического и магнитного полей и геомагнитные индексы заимствованы с сайта OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>].)

В 06 UT D_{st} -индекс резко возрос до +15 нТл, что свидетельствует о сжатии магнитосферы. Наземные магнитные обсерватории фиксировали в этот момент внезапное начало магнитной бури (SSC). Одновременно возросли геомагнитные индексы авральной активности (AE) и планетарной магнитной активности (K_p). Межпланетное электрическое поле E испытало резкое усиление позднее, в 08 UT. После первого положительного импульса D_{st} -индекс стал снижаться, что характеризует развитие кольцевого тока, и достиг минимума в 20–21 UT, что означало окончание главной фазы магнитной бури. Пик авральной активности пришелся на 16 UT, а максимальный уровень общепланетарной магнитной активности длился с 06 до 23 UT. Закончилась магнитная буря к концу следующих суток, 18 марта.

В первые шесть часов бури поведение ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний было обычным для таких условий: резкие импульсы, сливающиеся в непрерывный иррегулярный волновой процесс в виде геомагнитных пульсаций PiB+PiC, затухающий примерно к 10:30 UT. Однако в 12:30 UT, на фоне возобновившихся импульсов PiB, на отдельных станциях наблюдается полоса излучения с начальной частотой около 0.5 Гц и шириной 0.1–0.2 Гц (см. рис. 2, на котором показан динамический спектр излучения в координатах частота–время по данным ст. Монды; интервал наблюдения излучения выделен вертикальными линиями). Частота плавно, в течение 30 мин, возрастает от 0.5 до 0.7 Гц. Далее происходит необычный ступенчатый рост частоты. Сначала появляется первая «ступенька» длительностью около 3 ч. Затем снова происходит подъем частоты и формируется следующая ступенька. Всего наблюдаются

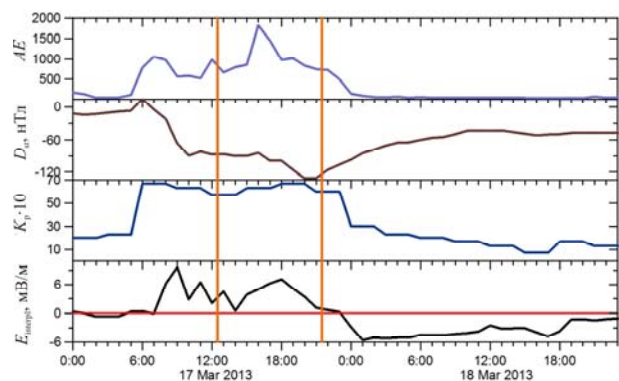


Рис. 1. Геомагнитные индексы AE , D_{st} и K_p , а также межпланетное электрическое поле E (среднечасовые значения) 17–18 марта 2013 г. Вертикальными линиями ограничен интервал наблюдения анализируемого излучения на ст. Монды и Узур

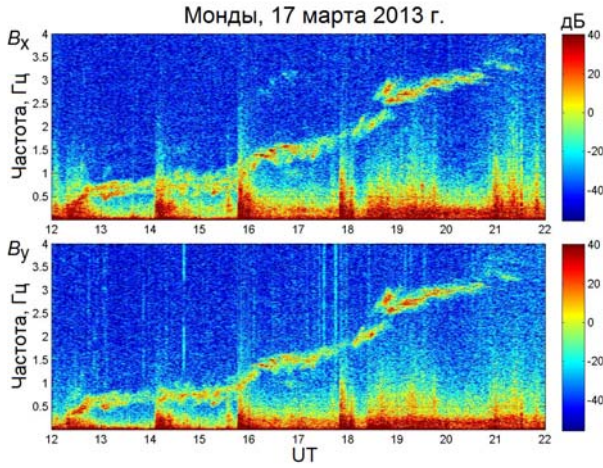


Рис. 2. Динамический спектр двух горизонтальных компонент переменного магнитного поля. Данные получены с выхода индукционного магнитометра

три таких перехода. Каждый переход не мгновенный, занимает около 30 мин. За 9 ч частота пульсаций возросла примерно в семь раз, от 0.5 до 3.5 Гц. Каждый из таких уровней (ступенек) не совсем горизонтален, частота и в пределах ступенек плавно растет, при этом полоса иногда раздваивается, уширяется до примерно 0.5 Гц, проглядываются отдельные структурные элементы. В целом динамический спектр сигнала очень необычный и по форме напоминает взлетающего дракона. Заканчивается излучение в 21:00–21:30 UT структурным элементом падающего тона.

Нам удалось получить данные индукционных магнитометров семи станций из разных регионов. Географические координаты станций, а также значения L -параметра Мак-Илвейна и разница во времени относительно мирового времени UT (вычислены по модели, представленной на сайте [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html], для эпохи 2013 г. и уровня 100 км) приведены в табл. 1. Сигнал был виден лишь на трех станциях (рис. 3), причем на ст. Якутск (YAK) наблюдалось только начало сигнала, затем он обрывается. На ст. Монды (MND) и Узур (UZU), удаленных друг от друга на 520 км, сигнал наблюдался практически одновременно, его форма была почти одинаковой. Якутск удален от ст. Монды на 2100 км, но и там имеющееся разрешение записи и довольно размытая форма сигнала не позволяют говорить о каком-либо запаздывании между наблюдением излучения в этих двух точках. Следующая ближайшая к Мондам ст. Борок (BOX, расстояние 3900 км) не зафиксировала даже следов излучения, как и три остальные станции, две из которых (Dawson Citi (DAWS) и Thief River Falls (THRF)) расположены в Западном полушарии.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Общепринято, что пульсации в диапазоне Pc1, наблюдающиеся на земной поверхности, являются отражением генерации ИЦВ за счет их взаимодействия с энергичными ионами магнитосферной плазмы [Cornwall, 1965; Гульельми, Троицкая, 1973]. Обычно, однако, несущая частота излучения остается либо

постоянной, либо меняется в небольших пределах. Здесь же мы имеем дело с семикратным возрастанием частоты. Для понимания природы исследуемого излучения необходимо ответить на следующие вопросы: 1) где происходит возбуждение колебаний; 2) что является причиной столь необычного повышения несущей частоты.

Обратимся к известной модели генерации ионно-циклотронного излучения в земной магнитосфере [Cornwall, 1965]. Она предполагает, что неустойчивость, приводящая к возбуждению ИЦВ, возникает вследствие резонанса волнового поля с циклотронным движением ионов в замагниченной плазме на частоте ниже ионно-циклотронной частоты. Для этого фазовая скорость волны, которую можно считать равной альвеновской скорости A , должна быть меньше продольной составляющей тепловой скорости ионов $W_{\parallel i}$, т. е. $W_{\parallel i} \gg A$. При этом частота f_w генерируемых ИЦВ равна

$$f_w = \frac{A}{W_{\parallel i}} \frac{\Omega_i}{2\pi}, \quad (1)$$

где

$$A = B / \sqrt{4\pi m_p N_{\text{ieff}}}$$

и

$$N_{\text{ieff}} = N_p \left(1 + \sum_i m_i N_i / m_p N_p \right).$$

Здесь $\Omega_i = e_i B / m_i c$ — гирочастота ионов; e_i и m_i — соответственно заряд и масса ионов; N_p — концентрация протонов, суммирование в (1) ведется по всем сортам ионов, кроме протонов; B — магнитное поле; c — скорость света. Условие $W_{\parallel i} \gg A$ и формула (1) накладывают определенные ограничения на область возбуждения волн и энергию ионов, генерирующих колебания заданной частоты. Рассмотрим их.

Переходя от тепловой скорости $W_{\parallel i}$ к продольной энергии протонов $E_{\parallel i}$, перепишем (1) в виде

$$f_w = \frac{e_i}{4\pi m_i c} \frac{B^2}{\sqrt{2\pi N_{\text{ieff}} E_{\parallel i}}} \quad (2)$$

или, подставляя значения физических констант и выражая магнитное поле в нТл, концентрацию в см^{-3} , а энергию в кэВ, получим частоту ИЦВ в Гц:

$$f_w = 7.6 \cdot 10^{-4} \frac{k B^2}{\sqrt{N_{\text{ieff}} E_{\parallel i}}} \left(\frac{m_p}{m_i} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где m_p — масса протона, k — кратность заряда резонансных ионов. Далее надо определить условия, при которых возможна генерация ИЦВ в диапазоне $0.5 \leq f_w \leq 3.5$ Гц. Подстановка в (3) наблюдаемых значений частоты приводит к двустороннему неравенству

$$4.33 \cdot 10^5 \text{ Гц}^2 \leq \frac{k^2 B^4}{N_{\text{ieff}} E_{\parallel i}} \left(\frac{m_p}{m_i} \right) \leq 2.12 \cdot 10^7 \text{ Гц}^2. \quad (4)$$

Условие же $W_{\parallel i} \gg A$ в удобных для измерения единицах преобразуется к виду

$$\frac{N_{\text{ieff}} E_{\parallel i} m_p}{B^2} \gg 2.48 \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

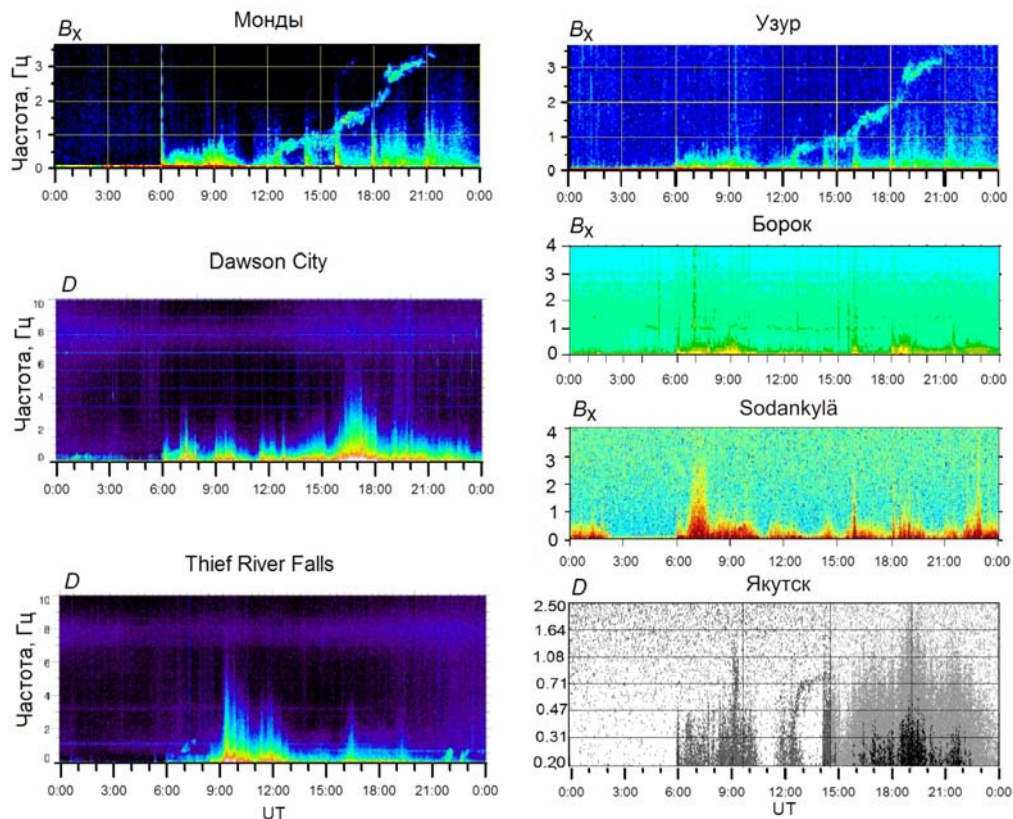


Рис. 3. Спектрограммы, построенные по записям индукционных магнитометров за 17 марта 2013 г. Указаны компоненты магнитного поля, использованные для получения динамических спектров

Таблица 1

Станция	Географические координаты		L -параметр	Местное время в полночь по Гринвичу
	φ	λ		
Dawson City (DAWS)	64.0	220.9	6.1	10.3
Sodankylä (SOD)	67.4	26.6	5.4	21.2
Thief River Falls (THRF)	48.0	263.6	3.5	6.6
Якутск (YAK)	62.0	129.7	3.4	15.8
Борок (BOX)	58.1	38.2	3.0	20.8
Узур (UZR)	53.3	107.7	2.35	16.9
Монды (MND)	51.6	100.9	2.2	17.3

Далее мы рассмотрим, какие правдоподобные значения энергии и плотности плазмы могут удовлетворять этому неравенству в магнитосфере.

Но сначала приведем общую картину наблюдения пульсаций Pc1 на различных наземных станциях. Рисунок 4 показывает в полярных координатах (вид с Северного полюса, Солнце вверху) траектории семи станций, оборудованных индукционными магнитометрами, данные которых были нами проанализированы (см. табл. 1). Как было уже сказано, интересующий нас сигнал наблюдался лишь на трех станциях, причем на ст. Якутск сигнал был виден лишь в первые три часа, а затем исчез.

Обычно считается, что наиболее вероятной областью генерации жемчужин является плазмопауза и прилегающие к ней области плазмосферы [Glangaud,

Lacoste, 1971; Гульельми, Троицкая, 1973; Mazur, Potapov, 1983]. Это подтверждают и прямые измерения ИЦВ на спутниках Cluster [Pickett et al., 2010]. Ионы кольцевого тока пересекают районы повышенной плотности плазмы, что обеспечивает выполнение условия (5). В возмущенных условиях плазмосфера подвергается эрозии под действием проникающего в магнитосферу электрического поля, и плазмопауза располагается на магнитных оболочках $L_p < 4$. Рассматриваемое нами событие происходило на фоне главной фазы сильной магнитной бури, когда индекс D_{st} , характеризующий интенсивность кольцевого тока, опускался ниже -130 нТл. К сожалению, мы не можем с точностью указать положение плазмопаузы во время наблюдения анализируемого сигнала, поскольку спутники, позволяющие

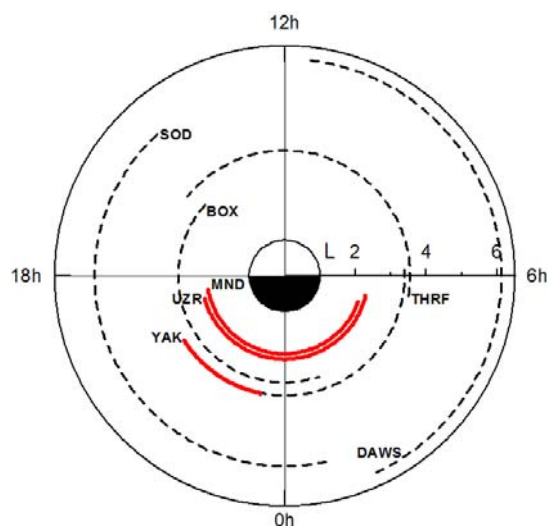


Рис. 4. Траектории суточного движения семи станций, оборудованных индукционными магнитометрами, в полярных координатах (вид с Северного полюса, Солнце вверху). Начало каждой траектории, показанной штриховой линией, соответствует 12 UT, рядом стоит код станции. Участки траекторий, на которых сигнал регистрировался соответствующей станцией, показаны серыми толстыми линиями

измерять ее положение при пересечении границы плазмосферы (Cluster, Themis), находились в это время в других областях магнитосферы. Многочисленные же эмпирические модели, прогнозирующие положение плазмопаузы [Carpenter, Anderson, 1992; Moldwin et al., 2002; Liu et al., 2015; Cho et al., 2015; Verbanac et al., 2015], плохо работают в условиях высокой магнитной активности. Достаточно сказать, что подстановка реальных значений параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов для 17 марта 2013 г. в модель [Verbanac et al., 2015] дает отрицательные значения L_p для ночных часов. Тем не менее, сопоставляя поведение магнитосферы во время этой бури с другими магнитными бурями, а именно 22–23 апреля 2001 г. и 28–31 октября 2003 г. [Goldstein et al., 2005; Liu et al., 2015], можно сделать вполне обоснованные предположения о динамике плазмопаузы во время данного события. Так, на протяжении главной фазы более слабой бури 22.04.2001 плазмопауза в ночном секторе опустилась до $L_p=3$, как следует из рис. 2 работы [Goldstein et al., 2005]. Во время намного более сильной бури 28–31.10.2003 плазмосфера во время главной фазы сократилась до такой степени, что в ночном секторе плазмопауза заняла положение $L_p \leq 2$, хотя перед бурей занимала положение $L_p=4$, как это видно из рис. 9 работы [Liu et al., 2015]. Можно предположить, что в нашем промежуточном случае плазмопауза во время второй половины главной фазы бури могла сместиться в вечерне-полуночном секторе от $L_p=3-4$ до $L_p=2.4-2.7$. Такое предположение поддерживается и поведением геомагнитных индексов на рис. 1, где видно, что K_p - и AE -индексы, как, впрочем, и межпланетное электрическое поле, имели повышенные значения еще за несколько часов до начала анализируемого нами интервала 12–22 UT, что свидетельствует о накоплении энергии в магнитосфере, способствующем эрозии плазмосферы.

Сказанное не позволяет все же понять общую картину возникновения, развития и условий наблюдения анализируемого излучения. Действительно, при взгляде на рис. 4 возникают следующие вопросы. Во-первых, почему не наблюдалось излучения на более высокоширотных ст. SOD и DAWS, а также не наблюдалось даже следов излучения на ст. BOX, вошедшей в вечерне-полуночный сектор через 4 ч после MND, хотя на ст. UZR и MND оно в это время продолжалось? Во-вторых, почему излучение оборвалось примерно в 23 LT на ст. YAK? И, в-третьих, самый главный вопрос: за счет чего произошло почти семикратное повышение частоты излучения на ст. MND и UZR? Одним из возможных объяснений могло бы быть предположение о наличии локального источника пульсаций на широте $50-55^\circ$ N в меридиональном интервале $100-105^\circ$ E, вращающегося вместе с Землей, а следовательно, находящегося где-то достаточно низко, в плазмосфере или ионосфере. Такой источник был описан в работах [Yahnin et al., 2007; Ермакова и др., 2015]. В основном авторы связывают свои наблюдения с пятнообразными выпадениями протонов или тяжелых ионов [Bräysy et al., 1998; Søråas et al., 2013]. Однако нам представляется, что подобные выпадения, чаще всего локального и кратковременного характера [Bräysy et al., 1998], не могут объяснить столь долговременного непрерывного излучения, какое наблюдалось 17 марта 2013 г. Ниже мы попытаемся ответить на поставленные вопросы, предложив другое объяснение.

На рис. 5 показаны спектрограмма анализируемого сигнала (a) в координатах частота–время и вариации индекса возмущенности магнитного поля на низких широтах $SYM-D$ (б), индекса авроральной активности AE (в), компоненты E_y межпланетного электрического поля (г), вертикальной компоненты B_z межпланетного магнитного поля ММП (д). Помимо самого сигнала, следует обратить внимание на вертикальные всплески в нижней части панели (рис. 5, a). Это иррегулярные пульсации типа PiB, они отражают моменты инжекции заряженных частиц в ионосферу. Во время слабых и умеренных возмущений инжекции происходят в авроральных широтах, но во время сильных магнитных бурь область инжекций смещается в средние широты. Поэтому на рисунке моменты появления PiB почти не коррелируют с вариациями аврорального индекса AE , но неплохо совпадают с усилениями низкоширотной возмущенности поля (индекс $SYM-D$). Кроме того, видно, что все они появляются через некоторое время после поворота B_z на юг, в периоды отрицательных значений этой компоненты ММП, когда происходит пересоединение магнитных силовых линий в лобовой части магнитосферы. Сравнивая моменты появления PiB с динамическим спектром сигнала, мы видим, что после инжекции происходит усиление ослабленного до этого сигнала (около 14 UT), повышение частоты (примерно в 18 UT) или одновременно то и другое (16 UT). Интересно, что после 16 UT в нижней части спектрограммы появляется еще один тип излучения — геомагнитные пульсации типа PiC («шипения»), имеющие вид непрерывного потемнения над горизонтальной осью, а после 18 UT

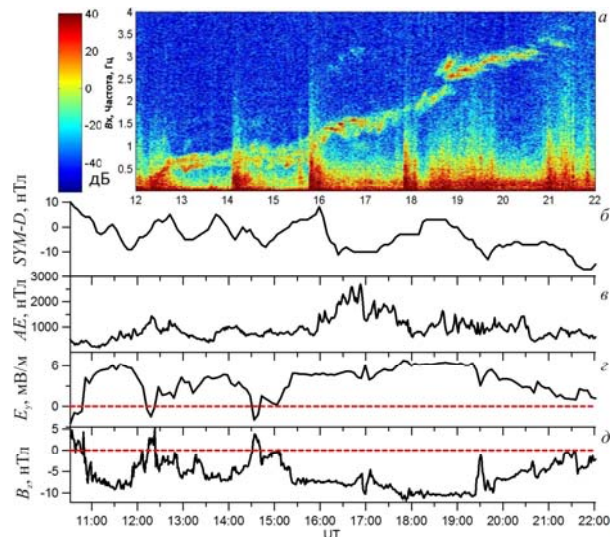


Рис. 5. Динамический спектр анализируемого излучения (а) и одновременные вариации геомагнитных индексов и параметров межпланетных электрического и магнитного полей: индекса $Sym-D$, характеризующего симметричную часть азимутальной компоненты низкоширотных геомагнитных возмущений (б), индекса авроральной активности AE (в), Y -компоненты межпланетного электрического поля E_y (г), вертикальной компоненты ММП B_z (д) на PiC накладываются следующие один за другим более слабые импульсы PiB . Все это говорит о нарастающей волновой активности в магнитосфере.

Как свидетельствуют исследования динамики магнитосферы во время сильных магнитных бурь [Smith, Hoffman, 1974; Zhang et al., 2015; Dandouras et al., 2009; Goldstein et al., 2005], при взаимодействии с ударным потоком солнечного ветра происходят два определяющих процесса: 1) переброс магнитных силовых линий из дневной магнитосферы в хвост с последующим пересоединением в нейтральном слое хвоста и инжекцией ускоренных ионов в ночную магнитосферу с образованием носовых структур энергетических спектров, соответствующих квазимонохроматическим потокам; 2) проникновение межпланетного электрического поля, приводящее к росту внутримангитосферного электрического поля «утро–вечер» и, соответственно, к усилению сил конвекции и градиентного дрейфа, вызывающих эрозию плазмосферы и приближение плазмопаузы к Земле. Оба процесса протекают в импульсном режиме, сопровождаясь высыпанием электронов и тепловых ионов в ионосферу с генерацией всплесков иррегулярных пульсаций PiB . Возвращаясь к рис. 5, можно предположить, что те импульсы PiB , которые предшествуют усилению интенсивности излучения, возникают под действием отрицательной B_z -компоненты ММП (рис. 5, д), инициирующей процесс 1, а импульсы, после которых повышается частота излучения, вызываются процессом 2 — действием межпланетного электрического поля (рис. 5, г), проникающего в магнитосферу. Разумеется, оба эти процесса тесно взаимосвязаны.

Восстановим картину событий. Вслед за ударным фронтом, достигшим магнитопаузы в 06 UT, на магнитосферу воздействовал высокоскоростной поток межпланетной плазмы. При этом возросло ди-

намическое давление солнечного ветра, направление B_z -компоненты ММП скачкообразно менялось, но ее среднечасовые значения были отрицательны (рис. 5, д). Воздействие высокоскоростного потока на геомагнитное поле привело к его возмущению, вызвало магнитосферную бурю. Значительно усилился кольцевой ток, что отразилось в поведении D_{st} -индекса: к 20 UT он опустился до -132 нТл; повысилась общая магнитная возмущенность: K_p -индекс возрос до 6.7, AE -индекс — до 1822 нТл (рис. 1, 5, в).

В таких условиях, как отмечают авторы [Goldstein et al., 2005], изучавшие поведение магнитосферы во время уже упоминавшейся бури 22–23 апреля 2001 г., каждый интервал поворота B_z ММП на юг сопровождается включением процесса пересоединения на дневной стороне и, с получасовым запаздыванием, перемещением плазмопаузы к Земле. Кроме того, совместное действие усиленной конвекции, градиентного дрейфа и коротации приводит к переносу ионов из плазменного слоя на более низкие L -оболочки в плазмосферу [Smith, Hoffman, 1974]. При этом силы коротации и градиентного дрейфа обуславливают появление так называемой носовой структуры в динамическом спектре ионов; в плазмосферу проникает острие этого «носа», которому соответствуют почти монохроматические потоки ионов с энергией до 5–15 кэВ, пополняющие кольцевой ток [Smith, Hoffman, 1974; Золотухина, Бондаренко, 1976; Burke et al., 1998; Ganushkina et al., 2000]. В работах [Золотухина, 1982; Kangas et al., 1998] показано, что в области «носа» происходит черенковская или циклотронная генерация волн в диапазоне $Pc1$ при изотропном или анизотропном распределении частиц по питч-углам соответственно. В случае неоднократных последовательных инжекций, вызванных повторяющимися воздействиями на магнитосферу направленного на юг ММП, а также при усилении поля конвекции энергия поступающих из хвоста ионов может вырасти в несколько раз [Золотухина, 1982; Kangas et al., 1998], превысив, по крайней мере, 32 кэВ [Dandouras et al., 2009].

Учитывая сказанное, можно в качестве одного из вариантов предложить следующую последовательность дальнейших событий. В 12 UT на фоне продолжающегося с 06 UT поступления энергии из солнечного ветра началась генерация ИЦВ, распространявшихся вдоль силовых линий до поверхности Земли и наблюдавшихся в виде геомагнитных пульсаций типа $Pc1$ на трех станциях: MND, UZR и YAK (рис. 3, 4). Скорее всего, область генерации ИЦВ находилась на внешнем краю плазмосферы, непосредственно под плазмопаузой. В 12 UT околополуденная часть плазмопаузы располагалась в промежуток между L -оболочками 3.5 и 4. В это же время плазмосферу начали пронизывать потоки ускоренных ионов умеренной энергии из хвоста магнитосферы. Далее, с учетом выводов, сделанных в [Goldstein et al., 2005; Dandouras et al., 2009; Liu et al., 2015; Cho et al., 2015], можно предположить, что в последующие часы, с одной стороны, плазмопауза приближалась к Земле и к 21 UT достигла в своей околополуденной части уровня $L_p=2.5-3$; с другой

Таблица 2

Наблюдавшийся диапазон изменения частоты, положение плазмопаузы L_p и предполагаемые значения плотности плазмы N_{eff} , магнитного поля B_p , энергии резонансных протонов $E_{\text{рез}}$ в области генерации колебаний непосредственно под плазмопаузой на полуночном меридиане

Интервал времени		f_w , Гц	L_p	N_{eff} , см ⁻³	B_p , нТл	$E_{\text{рез}}$, кэВ
UT	LT ст. MND					
12:30–14:05	19:30–21:05	0.5–0.7	4.0–3.8	$(4.6–6.5) \cdot 10^3$	360–445	8.4–7.1
14:05–15:45	21:05–22:45	0.5–1.2	3.8–3.35	$(0.5–1.5) \cdot 10^4$	445–780	13.9–7.7
15:45–18:45	22:45–01:45	0.9–2.4	3.35–2.8	$(1.5–5.0) \cdot 10^4$	625–1320	13.7–6.0
18:45–21:00	01:45–04:00	2.5–3.5	2.7–2.4	$(6.4–14) \cdot 10^4$	1500–2070	7.3–6.1
21:00–21:30	04:00–05:30	3.5–3.2	2.4	$1.4 \cdot 10^5$	2070–2040	6.1–6.9

стороны, последовательные инъекции ионов порождали потоки частиц возрастающей энергии, которые проникали все глубже во внутреннюю магнитосферу, достигая внешних частей плазмосферы.

Чтобы понять, как сказывались эти процессы на условиях генерации и частоте возбуждаемых ИЦВ, оценим физические параметры среды в предполагаемых областях генерации волн, основываясь на модели магнитного поля Цыганенко [<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>] и имеющихся данных прямых спутниковых наблюдений во время аналогичных геомагнитных возмущений. Так, обобщая результаты измерений плотности электронов, приведенные в [Liu et al., 2015; Cho et al., 2015], можно прийти к заключению, что в возмущенные периоды в ночной плазмосфере концентрация электронов подчиняется закону $N_e \approx 2 \cdot 10^7 L^{-6.7}$ см⁻³. Переходя от этой величины к эффективной концентрации ионов, определяющей значение альвеновской скорости (см. (1)), учтем, что в плазмосфере, особенно в возмущенное время, имеются примеси тяжелых ионов кислорода и гелия, достигающие 20–30 % от числа протонов по числу ионов на единицу объема. Это приводит к тому, что эффективная плотность плазмы становится равной

$$\rho_{\text{pl}} = m_p k_{\text{heavy}} N_e = m_p N_e \frac{1 + 4\eta + 16\mu}{1 + \eta + \mu}, \quad (6)$$

где $\eta = N_{\text{He}^+}/N_p$; $\mu = N_{\text{O}^+}/N_p$. Коэффициент k_{heavy} в условиях возмущенной плазмосферы может меняться в пределах $k_{\text{heavy}} = 2–3$, поэтому для ориентировочных оценок можно принять $N_{\text{eff}} \approx 5 \cdot 10^7 L^{-6.7}$ см⁻³.

Проследим изменение магнитного поля на плазмопаузе, с 12 UT, когда основная станция наблюдения сигнала MND ($\lambda \approx 100^\circ$) находилась на меридиане 19 LT до 22 UT, когда ст. MND располагалась уже в предутренней области, на меридиане 05 LT. Согласно модели геомагнитного поля Цыганенко [<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>], в околополуночной области на обложках $L=3–4$ магнитное поле в 12–14 UT 17 марта 2013 г. составляло от 360 до 1100 нТл. Позднее, в 15–19 UT, когда меридиан $\lambda=100^\circ$ переместился к полуночи, магнитное поле на сместившейся к Земле до $L=2.8–3.4$ плазмопаузе составляло уже 600–1350 нТл. В конце события, в 20–21 UT, плазмопауза опустилась до $L=2.4–2.7$, где магнитное поле составило 1500–2100 нТл.

Энергия поступающих из геомагнитного хвоста ионов, как уже отмечалось выше, в соответствии с результатами [Smith, Hoffman, 1974; Dandouras et al., 2009] могла в ходе главной фазы бури меняться от 5 до 32 кэВ. Суммируя приведенные оценки параметров среды, мы можем составить сценарий, описывающий связь изменений частоты ИЦВ с эволюцией плазмосферы и потоков резонансных ионов на фоне развития магнитной бури. Такой сценарий проиллюстрирован табл. 2. Она составлена в предположении, что генерация излучения происходит в виде ИЦВ непосредственно под плазмопаузой в районе полуночного меридиана, а дальше падающие на ионосферу вдоль силовых линий волны распространяются вдоль ионосферного волновода в азимутальном и экваториальном направлениях. В табл. 2 весь период наблюдавшегося излучения разбит на пять временных интервалов, в каждом из которых режим колебаний был более-менее неизменным. В первых двух столбцах приведены начало и конец каждого интервала по мировому времени (UT) и местному времени (LT) ст. Монды. Третий столбец содержит диапазон наблюдаемых частот f_w на протяжении каждого интервала времени, четвертый — диапазон изменения положения плазмопаузы L_p , пятый — соответствующие положению плазмопаузы значения эффективной плотности ионов фоновой плазмы непосредственно под плазмопаузой, шестой — соответствующие значения поля на полуночном меридиане, вычисленные по модели Цыганенко T01. В седьмом столбце показаны значения энергии резонансных протонов, необходимые для генерации ИЦВ в указанных условиях в соответствии с формулой (3). Условие (5) везде уверенно выполняется.

Первый интервал — начало колебаний, видно слабое увеличение частоты, связанное с небольшим приближением плазмопаузы к Земле и соответствующим усилением магнитного поля. Интервал энергий резонансных протонов невелик, сами энергии тоже ниже средних. Инжекция в начале второго интервала не привела к повышению частоты, т. е. плазмопауза, видимо, осталась на прежнем месте, $L_p=3.8$. Однако произошло некоторое усиление интенсивности излучения и уширение полосы частот, что, скорее всего, связано с вбросом из хвоста свежих потоков протонов с более широким спектром энергий, включающим в себя энергии до 14 кэВ.

Частота излучения повысилась лишь к концу второго интервала, и это обусловлено, по-видимому, небольшим импульсом в 15:35 UT. Он свидетельствует об усилении поля утро–вечер в магнитосфере, сдвигающем плазмопаузу внутрь на $0.45 R_E$ за очень короткое время. Третий, самый длительный интервал характеризуется устойчивым повышением частоты со значительным усилением интенсивности колебаний в начале интервала, что может объясняться новой инъекцией в 15:45 UT. Дополнительное увеличение скорости подъема частоты с одновременным усилением интенсивности произошло после двойного импульса вокруг часовой метки 18 UT. Увеличение частоты обеспечено усилением магнитного поля в результате значительного сжатия плазмосферы (на $0.55 R_E$). Начиная с 18:30 UT режим инъекций в магнитосферу изменился, о чем свидетельствует картина низкочастотных импульсов; их интенсивность уменьшилась, но теперь они следуют один за другим почти непрерывно. Возможно, это привело к резкому, почти мгновенному смещению области генерации на меньшие высоты, по крайней мере на $0.1 R_E$, а также к усиленному потоку протонов из хвоста магнитосферы. Наконец, во время последнего, пятого интервала частота излучения впервые устремилась вниз. Мы считаем, что в эти полчаса плазмопауза не меняла своего положения, а частота снизилась в основном вследствие уменьшения магнитного поля на неизменной высоте за счет закономерного изменения конфигурации поля при переходе от главной к восстановительной фазе магнитной бури, как об этом свидетельствует модель Цыганенко T01. В заключение отметим, что, в принципе, резонансными могли быть не только протоны, но и ионы гелия или кислорода. Тогда энергия частиц, требуемая для генерации излучения той же частоты, должна быть ниже в 4 раза для ионов гелия и в 16 раз для ионов кислорода. Но при этом для кислорода неравенство (5) уже не будет сильным, т. е. тепловая скорость ионов будет лишь ненамного выше альвеновской скорости.

Заметим также, что в формулах (1)–(5) в качестве тепловой скорости и энергии ионов фигурируют их продольные составляющие $W_{\parallel i}$ и $E_{\parallel i}$. В то же время для возникновения ионно-циклотронной неустойчивости требуется достаточно сильная температурная анизотропия вида $T_{\perp i} > T_{\parallel i}$. Поэтому в действительности требуемые для возбуждения ИЦВ значения полной энергии в табл. 2 должны быть выше.

Теперь мы можем ответить на поставленные выше три вопроса о природе наблюдавшегося излучения.

1. ИЦВ возбуждались протонами средних энергий (5–14 кэВ) во внешней области плазмосферы, непосредственно под плазмопаузой. Далее они распространялись вдоль силовых линий к ионосфере, где частично просачивались к земной поверхности, а частично захватывались в ионосферный волновод. В волноводе они могли распространяться в азимутальном направлении и по направлению к низким широтам. По направлению к полюсу за проекцией

плазмопаузы в ионосфере располагалась зона сильной турбулентности с пониженным содержанием плотности плазмы — ионосферный провал. Поэтому в полярном направлении волны распространяться не могли. Именно поэтому они не наблюдались на станциях выше широты ст. Якутск.

2. Во время главной фазы геомагнитной бури плазмопауза смещалась на более низкие L -оболочки, сопряженные со все более низкоширотными станциями. Примерно в 15 UT ст. Якутск оказалась вне плазмосферы, в ионосферном провале, поэтому сигнал там прервался. Почти на той же широте, что и ст. Якутск, находится ст. Thief River Falls, однако во время генерации излучения она располагалась в дневном секторе, поэтому сигнал там не наблюдался даже в первые часы события.

3. Основную роль в повышении частоты излучения играет магнитное поле, усиливающееся в области генерации по мере приближения плазмопаузы к Земле. Это видно из формулы (3), в которой магнитное поле B фигурирует во второй степени, по контрасту с плотностью плазмы и энергией протонов, имеющих степень $1/2$. А магнитное поле меняется в зависимости от положения оболочки в среднем по закону $B \sim L^{-3}$, поэтому сдвига области генерации на $1.6 R_E$ оказалось достаточно для возрастания частоты в семь раз, несмотря на то, что плотность плазмы при этом выросла в тридцать раз.

Заметим, что предлагаемый нами сценарий описанного события не претендует на полноту и не является единственно возможным. Тем не менее нам представляется, что он вполне мог иметь место в действительности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Уникальность рассмотренного события состоит в том, что ранее не наблюдалось излучений регулярного характера в диапазоне 0.2–5 Гц столь длительных и с таким большим диапазоном изменения частоты. По своей морфологии наиболее близкими к рассмотренным здесь являются структурированные излучения Pc1 (жемчужины) с плавно изменяющейся частотой [Feygin et al., 2000] и колебания убывающего периода (КУП, или IPDP) [Сизова и др., 1977; Гульельми, Золотухина, 1978]. Однако «жемчужины» с меняющейся несущей частотой длятся обычно не более 5–6 ч, хотя бывают исключения [Ермакова и др., 2015; Kim et al., 2016], а главное, диапазон изменения частоты жемчужин не превышает 1.5 октавы (отношение максимальной частоты к минимальной менее 3). К тому же появляются они при меньшем уровне магнитной активности. Приводимые в [Feygin et al., 2000] события регистрировались при значениях индекса AE не выше 600 нТл, а в нашем случае его среднечасовое значение достигало 1800 нТл (рис. 1). В отличие от жемчужин, пульсации типа КУП наблюдаются при высокой магнитной активности во время как главной, так и восстановительной фазы магнитной бури [Сизова и др., 1977]. При этом их генерацию связывают с инъекциями заряженных частиц из хвоста во внутреннюю магнитосферу

[Гульельми, Золотухина, 1978]. Но КУП имеют обычно шумовой характер, хотя сквозь шумовую полосу прорываются иногда дискретные элементы [Гульельми, Троицкая, 1973]. Тем не менее КУП относят к иррегулярным геомагнитным пульсациям. Они имеют широкую полосу частот, мгновенные значения $\Delta f/f \approx 1$ при характерной длительности всего события $\Delta t \approx 20\text{--}100$ мин. Диапазон изменения частоты невелик, обычно от 0.5 до 2 Гц. Однако в целом, если непременно пытаться поместить наблюдаемое явление в какие-то рамки, рассмотренное событие можно считать чрезвычайно редким случаем долговременных узкополосных и крайне нестационарных КУП.

Какие же необычные условия в магнитосфере и за ее пределами могли привести к генерации такого излучения? Во-первых, очень длительный, ~ 16 ч, если брать среднечасовые величины, период отрицательных значений B_z -компоненты ММП и, соответственно, положительных и высоких значений компоненты E_y межпланетного электрического поля. Это обеспечило длительный процесс повторяющихся импульсных инжекций ионов из хвоста магнитосферы. Важным фактором явилось образование носовых структур в пространственно-энергетическом спектре внедряющихся частиц, что приводило к монохроматизации потоков и, следовательно, к генерации более узкополосных, чем в случае обычных КУП, ионно-циклотронных волн. Одновременно с процессом инжекции проникающее в магнитосферу межпланетное электрическое поле запустило достаточно длительный процесс эрозии плазмосферы, что привело к неуклонному, в течение 8–9 ч, сдвигу области генерации на более низкие L -оболочки с более сильным магнитным полем.

Мы надеемся, что предложенная картина возникновения необычного излучения поможет прояснить некоторые дополнительные детали процессов, происходящих в магнитосфере во время мощных возмущений, вызванных воздействием высокоскоростных потоков солнечного ветра.

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты регистрации узкополосного излучения в диапазоне Pc1 с возрастающей несущей частотой, продолжавшегося необычайно длительный период. Излучение наблюдалось на фоне главной фазы магнитной бури и имело локальный характер, проявляясь лишь на трех станциях, находящихся в интервале долгот $\lambda = 100\text{--}130^\circ$ Е и магнитных оболочек $L = 2.2\text{--}3.4$.

2. Предложен один из вариантов интерпретации излучения на основе стандартной модели генерации ионно-циклотронных волн в магнитосфере потоками ионов умеренных энергий. Предполагается, что непрерывный сдвиг области генерации ИЦВ на меньшие L -оболочки способен объяснить как локальность явления, так и диапазон повышения частоты.

3. Сформулированы морфологические отличия рассмотренного излучения от известных типов геомагнитных пульсаций и обсуждены возможные причины, приведшие к столь необычному событию.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты № 16-05-00631, 16-05-00056 и 15-45-05108. Авторы благодарят Н.А. Золотухину, внесшую вклад в понимание проблемы, А.В. Гульельми за обсуждение и ценные советы, Б.И. Клайна за помощь в работе и А.В. Моисеева за полезные замечания. Данные межпланетных наблюдений заимствованы с веб-сайта GSFC/SPDF OMNIWeb [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>]. За предоставление он-лайн доступа к суточным спектрограммам геомагнитных пульсаций мы благодарны Tero Raita (ст. Sodankylä) [<http://www.sgo.fi/>], руководителям проекта CARISMA I.R. Mann и D.K. Milling [Mann et al., 2008; <http://www.carisma.ca/>] и всей команде проекта (ст. Dawson City и Thief River Falls), а также С.В. Анисимову и наблюдателям ГО Борок [<http://geobrk.adm.yar.ru/>]. Расчеты магнитного поля были выполнены с использованием онлайн-модели T02 (разработчик Н. Цыганенко, СПбГУ) Центра моделирования Community Coordinated Modeling Center при Центре космических полетов Goddard Space Flight Center [<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гульельми А.В., Довбня Б.В. Гидромагнитное излучение межпланетной плазмы // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, вып. 10. С. 601–604.
- Гульельми А.В., Золотухина Н.А. Генерация МГД-волн возрастающей частоты в земной магнитосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 1978. Т. 18, № 2. С. 307–311.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А., Довбня Б.В., Потапов А.С. Диагностика холодной плазмы и энергичных частиц путем дисперсионного анализа «жемчужин» // Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. 1972. Вып. 24. С. 3–12.
- Ермакова Е.Н., Яхнин А.Г., Яхнина Т.А. и др. Спорядические геомагнитные пульсации на частотах до 15 Гц в период магнитной бури 7–14 ноября 2004 г.: особенности амплитудных и поляризационных спектров и связь с ионно-циклотронными волнами в магнитосфере // Известия вузов. Радиофизика 2015. Т. 58, № 8. С. 607–622.
- Золотухина Н.А., Бондаренко Н.М. Формирование энергетического спектра частиц в процессе дрейфа из хвоста вглубь магнитосферы // Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. 1976. Вып. 39. С. 3–7.
- Матвеева Э.Т., Калишер А.Л., Довбня Б.В. Физические условия в магнитосфере и межпланетном пространстве во время возбуждения геомагнитных пульсаций типа Pc1 // Геомагнетизм и аэрномия. 1972. Т. 12. С. 1125–1127.
- Полушкина Т.Н., Довбня Б.В., Потапов А.С. и др. Частотная структура спектральных полос ионосферного альвеновского резонатора и параметры ионосферы // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 2. С. 39–57.
- Сизова Л.З., Шевнин А.Д., Золотухина Н.А. Связь между колебаниями убывающего периода и полем D_{st} -вариаций // Геомагнетизм и аэрномия. 1977. Т. 17, № 6. С. 1070–1075.
- Bräysy T., Mursula K., Marklund G. Ion cyclotron waves during a great magnetic storm observed by Freja double-probe electric field instrument // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 4145–4155. DOI: 10.1029/97JA02820.
- Burke W.J., Maynard N.C., Hagan M.P., et al. Electrodynamics of the inner magnetosphere observed in the dusk sector by CRRES and DMSP during the magnetic storm of June 4–6, 1991 // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 29399–29418.

Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 1097–1108. DOI: 10.1029/91JA01548.

Cho J., Lee D.-Y., Kim J.-H., et al. New model fit functions of the plasmopause location determined using THEMIS observations during the ascending phase of solar cycle 24 // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120. P. 2877–2889. DOI: 10.1002/2015JA021030.

Cornwall J.M. Cyclotron instabilities and electromagnetic emission in the ultra-low frequency and very low frequency ranges // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70, N 1. P. 61–69. DOI: 10.1029/JZ070i001p00061.

Dandouras I.S., Reme H., Cao J., Escoubet P. Magnetosphere response to the 2005 and 2006 extreme solar events as observed by the Cluster and Double Star spacecraft // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43. P. 618–623.

Feygin F.Z., Kleimenova N.G., Pokhotelov O.A., et al. Nonstationary pearl pulsations as a signature of magnetospheric disturbances // *Ann. Geophysicae.* 2000. V. 18, N 5. P. 517–522.

Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Sergeev V.A., et al. Entry of plasma sheet particles into the inner magnetosphere as observed by Polar/CAMMICE // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 25205–25219.

Glangeaud F., Lacoume J.-L. Étude de la propagation des Pc1 en présence de gradients d'ionisation alignés sur le champ magnétique terrestre // *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences.* 1971. Serie B. V. 272, N 6. P. 397–400.

Goldstein J., Sandel B.R., Forrester W.T., et al. Global plasmasphere evolution 22–23 April 2001 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, A12218. DOI: 10.1029/2005JA011282.

Guglielmi A., Kangas J. Pc1 waves in the system of solar terrestrial relations: New reflections // *J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys.* 2007. V. 69. P. 1635–1643. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.01.015.

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (a review) // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 435–512.

Kim K.-H., Shiokawa K., Mann I.R., et al. Longitudinal frequency variation of long-lasting EMIC Pc1-Pc2 waves localized in the inner magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 1039–1046. DOI: 10.1002/2015GL067536.

Liu X., Liu W., Cao J.B., et al. Dynamic plasmopause model based on THEMIS measurements // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120. P. 10543–10556. DOI: 10.1002/2015JA021801.

Mann I.R., Milling D.K., et al. The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 141. P. 413–451. DOI: 10.1007/s11214-008-9457-6.

Mazur V.A., Potapov A.S. The evolution of pearls in the Earth's magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31, N 8. P. 859–863.

Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., et al. A new model of the location of the plasmopause: CRRES results // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A11. P. 1339. DOI: 10.1029/2001JA009211.

Mursula K., Kangas J., Kerttula R., et al. New constraints on theories of Pc1 pearl formation // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N A6. P. 12399–12406.

Pickett J.S., Grison B., Omura Y., et al. Cluster observations of EMIC triggered emissions in association with Pc1 waves near Earth's plasmopause // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L09104. DOI: 10.1029/2010GL042648.

Smith P.H., Hoffman R.A. Direct observations in the dusk hours of the characteristics of the storm time ring current particles during the beginning of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N 7. P. 966–971. DOI: 10.1029/JA079i007p00966.

Søråas F., Laundal K.M., Usanova M. Coincident particle and optical observations of nightside subauroral proton precipi-

itation // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013. V. 118. P. 1112–1122. DOI: 10.1002/jgra.50172.

Verbanac G., Pierrard V., Bandić M., et al. The relationship between plasmopause, solar wind and geomagnetic activity between 2007 and 2011 // *Ann. Geophys.* 2015. V. 33, N 10. P. 1271–1283.

Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U. Subauroral proton spots visualize the Pc1 source // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A10223. DOI: 10.1029/2007JA012501.

Zhang J.-C., Kistler L.M., Spence H.E., et al. “Trunk-like” heavy ion structures observed by the Van Allen Probes // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120, N 10. P. 8738–8748. DOI: 10.1002/2015JA021822.

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 5 августа 2016 г.).

URL: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html (дата обращения 5 августа 2016 г.).

URL: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 5 августа 2016 г.).

URL: <http://www.sgo.fi/> (дата обращения 5 августа 2016 г.).

URL: <http://www.carisma.ca/> (дата обращения 5 августа 2016 г.).

URL: <http://geobrk.adm.yar.ru/> (дата обращения 5 августа 2016 г.).

REFERENCES

Bräysy T., Mursula K., Marklund G. Ion cyclotron waves during a great magnetic storm observed by Freja double-probe electric field instrument. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, pp. 4145–4155. DOI: 10.1029/97JA02820.

Burke W.J., Maynard N.C., Hagan M.P., Wolf R.A., Wilson G.R., Gentile L.C., Gussenhoyen M.S., Huang C.Y., Garner T.W., Rich F.J. Electrodynamics of the inner magnetosphere observed in the dusk sector by CRRES and DMSP during the magnetic storm of June 4–6, 1991. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, pp. 29399–29418.

Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, pp. 1097–1108. DOI: 10.1029/91JA01548.

Cho J., Lee D.-Y., Kim J.-H., Shin D.-K., Kim K.-C., Turner D. New model fit functions of the plasmopause location determined using THEMIS observations during the ascending phase of Solar Cycle 24. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 2877–2889. DOI: 10.1002/2015JA021030.

Cornwall J.M. Cyclotron instabilities and electromagnetic emission in the ultra low frequency and very low frequency ranges. *J. Geophys. Res.* 1965. vol. 70, no. 1, pp. 61–69. DOI: 10.1029/JZ070i001p00061.

Dandouras I.S., Reme H., Cao J., Escoubet P. Magnetosphere response to the 2005 and 2006 extreme solar events as observed by the Cluster and Double Star spacecraft. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, pp. 618–623.

Ermakova E.N., Yakhnin A.G., Yakhnina T.A., et al. Sporadic geomagnetic pulsations at frequencies up to 15 Hz during the November 7–14, 2004 magnetic storm: Peculiarities of amplitude and polarization spectra and relationship with ion-cyclotron waves in the magnetosphere. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2015, vol. 58, no. 8, pp. 607–622. (In Russian).

Feygin F.Z., Kleimenova N.G., Pokhotelov O.A., Parrot M., Prikner K., Mursula K., Kangas J., Pikkariainen T. Nonstationary pearl pulsations as a signature of magnetospheric disturbances. *Ann. Geophysicae.* 2000, vol. 18, no. 5, pp. 517–522.

Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Sergeev V.A., Kubyshkina M.V., Baker D.N., Turner N.E., Grande M., Kelett B., Fennell J., Roeder J., Sauvaud J.-A., Fritz T.A. Entry of plasma sheet particles into the inner magnetosphere as observed by Polar/CAMMICE. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, pp. 25205–25219.

Glangaud F., Lacoume J.-L. Study of Pc1 propagation in presence of ionization gradients aligned on a terrestrial magnetic field. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*. 1971, serie B, vol. 272, no. 6, pp. 397–400. (In French).

Goldstein J., Sandel B.R., Forrester W.T., Thomsen M.F., Hairston M.R., Global plasmasphere evolution 22–23 April 2001. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A12218. DOI: 10.1029/2005JA011282.

Guglielmi A.V., Dovbnya B.V. Hydromagnetic emission of the interplanetary plasma. *Pis'ma v ZhETF* [JETP Lett.]. 1973, vol. 18, iss. 10, pp. 601–604. (In Russian).

Guglielmi A.V., Troitskaya V.A. *Geomagnitnye pulsatii i diagnostika magnitosfery*. Moscow: Nauka Publ., 1973. 208 p. (In Russian).

Guglielmi A.V., Zolotukhina N.A. Generation of MHD waves of increasing frequency in the Earth's magnetosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1978, vol. 18, no. 2, pp. 307–311. (In Russian).

Guglielmi A.V., Troitskaya V.A., Dovbnya B.V., Potapov A.S. Diagnostics of a cold plasma and energetic particles by dispersion analysis of pearls. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics] 1972, iss. 24, pp. 3–12. (In Russian).

Guglielmi A., Kangas J. Pc1 waves in the system of solar terrestrial relations: New reflections. *J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys.* 2007, vol. 69, pp. 1635–1643. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.01.015.

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (a review). *Space Sci. Rev.* 1998, vol. 83, pp. 435–512.

Kim K.-H., Shiokawa K., Mann I.R., Park J.-S., Kwon H.-J., Hyun K., Jin H., Connors M. Longitudinal frequency variation of long-lasting EMIC Pc1-Pc2 waves localized in the inner magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, pp. 1039–1046. DOI: 10.1002/2015GL067536.

Liu X., Liu W., Cao J.B., Fu H.S., Yu J., Li X. Dynamic plasmopause model based on THEMIS measurements. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2015, vol. 120, pp. 10543–10556. DOI: 10.1002/2015JA021801.

Mann I.R., Milling D.K., Rae I.J., et al. The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 141, pp. 413–451. DOI: 10.1007/s11214-008-9457-6.

Matveeva E.T., Kalisher A.L., Dovbnya B.V. Physical conditions in the magnetosphere and the interplanetary space during excitation of type Pc1 geomagnetic pulsations. *Geomagn. Aeron.* 1972, vol. 12, pp. 977–978.

Mazur V.A., Potapov A.S. The evolution of pearls in the Earth's magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1983, vol. 31, no. 8, pp. 859–863.

Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., Amin R., Anderson R.R. A new model of the location of the plasmopause: CRRES results. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A11, pp. 1339. DOI: 10.1029/2001JA009211.

Mursula K., Kangas J., Kerttula R., Pikkarainen T., Guglielmi A., Pokhotelov O., Potapov A. New constraints on theories of Pc 1 pearl formation. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104, no. A6, pp. 12399–12406.

Pickett J.S., Grison B., Omura Y., Engebretson M.J., Dandouras I., Masson A., Adrian M.L., Santolik O., Décréau P.M. E., Cornilleau-Wehrin N., Constantinescu D. Cluster observations of EMIC triggered emissions in association with Pc1 waves near Earth's plasmopause. *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, L09104. DOI: 10.1029/2010GL042648.

Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Potapov A.S., et al. Frequency structure of spectral bands of the ionospheric Alfvén resonator and parameters of the ionosphere. *Geofizicheskie issledovaniya* [Geophys. Res.]. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 39–57. (In Russian).

Sizova L.Z., Shevnin A.D., Zolotukhina N.A. Correlation between oscillations of decreasing period and the field of D_{st} variations. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1977, vol. 17, no. 6, pp. 1070–1075. (In Russian).

Smith P.H., Hoffman R.A. Direct observations in the dusk hours of the characteristics of the storm time ring current particles during the beginning of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. 7, pp. 966–971. DOI: 10.1029/JA079i007p00966.

Søråas F., Laundal K.M., Usanova M. Coincident particle and optical observations of nightside subauroral proton precipitation. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 1112–1122. DOI: 10.1002/jgra.50172.

Verbanac G., Pierrard V., Bandić M., Darrouzet F., Rauch J.-L., Décréau P. The relationship between plasmopause, solar wind and geomagnetic activity between 2007 and 2011. *Ann. Geophys.* 2015, vol. 33, no. 10, pp. 1271–1283.

Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U. Subauroral proton spots visualize the Pc1 source. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A10223. DOI: 10.1029/2007JA012501.

Zhang J.-C., Kistler L.M., Spence H.E., Wolf R.A., Reeves G., Skoug R., Funsten H., Larsen B.A., Niehof J.T., MacDonald E.A., Friedel R., Ferradas C.P., Luo H. “Trunk-like” heavy ion structures observed by the Van Allen Probes. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, no. 10, pp. 8738–8748. DOI: 10.1002/2015JA021822.

Zolotukhina N.A., Bondarenko N.M. Formation of energy spectrum of particles during a drift deep into the magnetosphere from its tail. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1976, iss. 39, pp. 3–7. (In Russian).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (accessed August 5, 2016).

URL: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html (accessed August 5, 2016).

URL: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/> (accessed August 5, 2016).

URL: <http://www.sgo.fi/> (accessed August 5, 2016).

URL: <http://www.carisma.ca/> (accessed August 5, 2016).

URL: <http://geobrk.adm.yar.ru/> (accessed August 5, 2016).