

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СИСТЕМЕ МАГНИТОСФЕРА—ИОНОСФЕРА КОМПРЕССИОННЫХ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ, ПРОНИКАЮЩИХ ИЗ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

FEATURES OF PROPAGATION OF COMPRESSIONAL LONG-PERIOD OSCILLATIONS PENETRATING FROM THE INTERPLANETARY MEDIUM IN THE MAGNETOSPHERE—IONOSPHERE SYSTEM

А.В. Моисеев 

*Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, moiseev@ikfia.ysn.ru*

В.И. Попов

*Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, volts@mail.ru*

В.В. Мишин

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

Ю.В. Пенских

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

A.V. Moiseev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, moiseev@ikfia.ysn.ru*

V.I. Popov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, volts@mail.ru*

V.V. Mishin

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

Yu.V. Pensikh

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

Аннотация. По спутниковым и наземным наблюдениям изучены свойства Pi3-пульсаций с периодом ~30 мин в системе магнитосфера—ионосфера. По данным наземных магнитных станций в предполуденном секторе магнитосферы, выявлено распространение пульсаций по азимуту с дневной стороны на ночную со скоростью 3–9 км/с в полосе исправленных геомагнитных широт $\Phi' = 76^\circ - 79^\circ$. Вдоль меридиана сигнал распространялся к полюсу со скоростью 0.5–5 км/с. Анализ спектров сигналов на станциях, расположенных вдоль разных меридианов, позволил выявить три максимума: первый, не зависящий от широты на частоте 0.55 мГц, и два широтнозависимых максимума на частотах 0.82 и 0.96 мГц, соответственно на более высокой и более низкой широтах. Первый максимум соответствует УНЧ-волнам, проникающим из солнечного ветра, два других — магнитосферным резонансам. Эквивалентная токовая система (ЭТС) во время регистрации пульсаций была рассчитана двумя способами: методом сферических элементарных токовых систем и с помощью техники инверсии магнитограмм. Анализ ЭТС, полученных обоими методами, показал их удовлетворительное согласие. ЭТС во время пульсаций в дополуночном секторе представляла собой большой вихрь, состоящий из более мелких, которые распространялись в ионосфере вдоль линии раздела море—суша, т. е. преобладало распространение по меридиану к полюсу со скоростями, близкими к скоростям распространения пульсаций. Согласно карте распределения продольных токов в ионосфере, широтный максимум западной электроструи лежит на широтах максимума ЭТС (на юге большого вихря) на границе между областями

Abstract. We have studied properties of Pi3 pulsations with a period of ~30 min in the magnetosphere—ionosphere system, using satellite and ground-based observations. According to the data from ground-based magnetic stations in the pre-noon sector of the magnetosphere, propagation of pulsations was revealed in azimuth from the day side to the night side at a velocity 3–9 km/s in the band of corrected geomagnetic latitudes $\Phi' = 76^\circ - 79^\circ$. Along the meridian, the signal propagated poleward at a velocity 0.5–5 km/s. Analysis of signal spectra at stations located along different meridians shows three maxima: one latitude-independent maximum at a frequency of 0.55 mHz, and two latitude-dependent maxima at frequencies of 0.82 and 0.96 mHz respectively, at higher and lower latitudes. The first maximum corresponds to ULF waves penetrating from the solar wind; the other two, to magnetospheric field line resonances. The equivalent current system (ECS) during the pulsation recording was obtained by two methods: the method of spherical elementary current systems and the magnetogram inversion technique. Analysis of ECS derived by both methods has demonstrated that they match each other. The ECS during pulsations in the pre-noon sector is a large vortex consisting of smaller vortices that propagate in the ionosphere along the “sea-land” boundary line, i.e. meridional poleward propagation at velocities close to the average pulsation propagation velocities prevailed. According to the map of field-aligned current distribution in the ionosphere, the width of the maximum of the westward electrojet lies at the latitude of the ECS maximum (in the south of the large vortex) on the boundary between the regions of inflowing and outflowing field-aligned currents

втекающих и вытекающих продольных токов (области 1 и 2), где наблюдаются резонансы силовых линий. Полученная ЭТС соответствует токовой системе DP2 с преобладающей западной электроструей в дополуночном и ночном секторах. Анализ спутниковых данных показал следующее: в солнечном ветре УНЧ-волны в диапазоне Pi3-пульсаций распространялись со скоростью 186.4 км/с, что значительно ниже скорости движения среды, достигавшей 550 км/с. Такая скорость объясняется тем, что волны распространяются в сторону Солнца и сносятся солнечным ветром к Земле. В магнитосфере пульсации с преобладающей компрессионной компонентой распространяются с ночной стороны на дневную со скоростью 90–110 км/с. По задержкам в наступлении максимумов дифференциальных потоков энергичных электронов были выявлены скорости распространения этих УНЧ-волн 20–40 км/с.

Сделан вывод, что пульсации в данном событии были обусловлены как внешним (колебаниями в солнечном ветре), так и внутренним источниками (магнитосферным резонатором, который мог быть возбужден в том числе и суббурей). При этом динамика тонкой структуры большого вихря (малых вихрей) в магнитосфере в целом совпадает по скорости и направлению распространения с геомагнитными пульсациями.

Ключевые слова: геомагнитные Pi3-пульсации, эквивалентные токовые вихри, азимутальное и меридиональное распространение, проникновение УНЧ-волн из межпланетной среды в магнитосферу, резонансы силовых линий.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что Pi3-пульсации — иррегулярные длиннопериодные колебания геомагнитного поля, которые могут генерироваться во время магнитосферной суббури [Saito, Matsushita, 1967]. В обзорной работе [Saito, 1978] приведена классификация, согласно которой Pi3 разделяются на подкатегории: Ps6 и PiP. Ps6-пульсации ($T > 400$ – 600 с) преобладают в D-компоненте геомагнитного поля, у PiP-пульсаций ($T < 400$ с) амплитуды сравнимы во всех компонентах. Источником Pi3, как и других геомагнитных пульсаций, являются пространственно-временные вариации интенсивности трехмерных токовых систем [Saito, 1969]. Pi3-пульсации, связанные с суббурей, как правило, локализованы в ночном секторе магнитосферы. В то же время известна связь Pi3-пульсаций с вариациями параметров межпланетной среды [Han et al., 2007]. В работе [Alimaganbetov, Streltsov, 2018] проведен статистический анализ волновых возмущений в солнечном ветре (СВ) во время суббурь и обнаружено, что волновые возмущения с частотами 0.6–0.7 МГц часто наблюдаются во время суббурь одновременно и в СВ, и на Земле. Предположительно, Pi3, обусловленные внешним воздействием, должны не только регистрироваться в ночном секторе магнитосферы, но и образовывать высокоширотную токовую систему соответствующих пространственных масштабов.

(regions 1 and 2), where field line resonances are observed. The obtained ECS corresponded to the DP2 current system with a predominant westward electrojet in the pre-noon and night sectors. Satellite data analysis has shown the following. In the solar wind, ULF waves in the Pi3 pulsation range propagated at a velocity of 186.4 km/s, which is significantly lower than the velocity of the medium being as high as 550 km/s. This velocity is explained by the fact that the waves propagate toward the Sun and are carried by the solar wind to Earth. In the magnetosphere, pulsations with a predominant compression component propagated from the night side to the day side at a velocity 90–110 km/s; from the delays in the onset of maxima of energetic electron differential fluxes, velocities 20–40 km/s were identified.

Pulsations in this event were caused by both external (oscillations in the solar wind) and internal sources (magnetospheric resonator, which could be excited, among other things, by a substorm). The dynamics of the “fine structure” of a large vortex — small vortices, in the magnetosphere as a whole coincides in propagation velocity and direction with geomagnetic pulsations.

Keywords: geomagnetic Pi3 pulsations, equivalent current vortices, azimuthal and meridional propagation, penetration of ULF waves from the interplanetary medium into the magnetosphere, field line resonance.

Известно, что взаимодействие диамагнитной структуры (ДС) с магнитосферой Земли приводит к явлениям, подобным суббуревым, которые могут сопровождаться Pi3-пульсациями [Пархомов и др., 2017]. Эти структуры фактически представляют собой магнитные жгуты, заполненные плазмой [Еселевич, Еселевич, 2005]. На их поверхности течет диамагнитный ток, уменьшающий магнитное поле внутри и увеличивающий его вне трубки.

Важной характеристикой пульсаций является их распространение, направление которого может указывать на их источник. В работе [Моисеев и др., 2020] по наземным геомагнитным наблюдениям было обнаружено азимутальное распространение пульсаций со скоростью 0.6–10.6 км/с на восток и на запад от полуночи, вдоль меридиана пульсации распространялись к экватору со скоростью 0.75–7.87 км/с. Распространение пульсаций можно оценивать также по смещению их токовых систем. В работе [Моисеев и др., 2024a] выполнено сравнение скоростей распространения геомагнитных пульсаций, локализованных на дневной стороне и обозначаемых TCV (travelling convection vortices), по фазовым задержкам пульсаций и на основе перемещения их эквивалентных токовых систем. Скорости распространения, измеренные этими методами, отличаются примерно в два раза (больше по фазовым задержкам).

Таблица 1

Координаты наземных станций (SMAG), используемых для изучения азимутального распространения пульсаций

Усредненная широта	Аббревиатура	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
76–79	GHC	68.63	264.15	77.54	–31.68
	IGC	69.30	278.2	78.43	–5.39
	UPN	72.78	303.85	78.93	40.20
	NAL	78.92	11.95	76.57	109.96
	DMH	76.77	341.37	77.34	84.38

В настоящей работе мы проанализируем распространение РіЗ-пульсаций, регистрируемых глобально по наземным и спутниковым наблюдениям. Продольные токи во время пульсаций будем изучать с помощью техники инверсии магнитограмм. Насколько нам известно, исследований динамики глобальных пульсаций и вихрей соответствующих пространственных масштабов ранее не проводилось.

Целью работы является изучение морфологии и динамики больших токовых вихрей — высокоширотной токовой системы глобальных РіЗ-пульсаций, а также изучение вклада внешних и внутренних источников в частотный спектр пульсаций. Для анализа было выбрано событие 11.09.2015, в котором наблюдались геомагнитные пульсации в диапазоне РіЗ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для изучения меридионального и азимутального распространения геомагнитных РіЗ-пульсаций и эквивалентных токовых вихрей использовались данные геомагнитных наблюдений известной базы данных SUPERMAG [Gjerloev, 2012; <https://supermag.jhuapl.edu/mag/>]: координаты станций приведены в табл. 1 и 2. Для построения эквивалентных токовых систем методом сферических элементарных токовых систем (СЭТС) использовалась 61 станция SUPERMAG с географическими широтами 45.14° – 77.47° и долготами 199.54° – 267.89° ; методом техники инверсии магнитограмм (ТИМ) — 144 станции Северном полушарии, 34 — в Южном полушарии. На спутниках использовались измерения базы данных CDAWEB [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>]. Координаты спутников приведены в табл. 3. Для изучения распространения использовались данные наземных станций с временным разрешением 60 с, поскольку длительность фазовых задержек сигналов ≥ 60 с. Спутниковые данные использовались с временным разрешением 3 (Themis), 60 (Geotail), 4 (Cluster), 5 с (GOES).

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Сравнивались скорости распространения по азимуту, полученные двумя методами: по фазовым задержкам магнитных вариаций на станциях и по перемещению вихрей эквивалентных ионосферных токов. Методы описаны в [Моисеев и др., 20246]. В исследуемом событии пульсации с хорошо выраженной формой наблюдались на высоких широтах, по-

этому их азимутальное распространение изучалось только вдоль исправленных геомагнитных широт $\Phi' = 76^\circ$ – 79° .

Продольные токи (ПТ) РіЗ-пульсаций изучались с помощью ТИМ [Базаржапов и др., 1979; Mishin, 1990; Пенских, 2020]. Этот метод позволяет рассчитывать основные электродинамические параметры ионосферы с одномоментным временным разрешением по данным поля геомагнитных вариаций мировой сети наземных магнитометров. В данной работе с помощью ТИМ были получены: эквивалентные токовые функции, ПТ при однородной проводимости, а также границы зон ПТ [Лунюшкин, Пенских, 2019; Пенских и др., 2021]. Для выделения РіЗ-пульсаций из геомагнитных данных нами использовался цифровой полосовой фильтр, настроенный на частоты, соответствующие этим пульсациям [Моисеев и др., 20246].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 показаны данные измерений параметров плазмы и межпланетного магнитного поля (ММП) в СВ: компоненты ММП и концентрация ионов ($a-z$), V_x -компонента скорости ионов и динамическое давление СВ P_d (d, e) по данным спутника THEMIS-B (ThB) в событии 11.09.2015. Внизу на панелях $ж, з$ для рассматриваемого интервала показаны индексы AL и $SYM-H$. С 9:00 до 11:00 UT наблюдались три колебания с периодом ~ 30 мин в B_z -компоненте ММП и P_d , которые проявились на земной поверхности в вариациях AL и геомагнитных пульсациях в диапазоне РіЗ. Колебаниям предшествовал интервал, в котором B_z ММП была направлена к югу с 07:30–09:00 UT. В это время отмечались $B_x < 0$, $B_y > 0$, V_x -компонента скорости СВ нарастала с 450 до 550 км/с. Концентрация ионов в этом интервале изменялась в противофазе с модулем ММП, такие изменения концентрации плазмы и магнитного поля наблюдаются в ДС [Пархомов и др., 2017], а также типичны для колебаний медленной моды [Hada, Kennel, 1985]. Как показывают геомагнитные индексы, событие регистрировалось во время умеренной магнитной бури и на фоне завершения интенсивной суббури, взрывная фаза которой длилась с 08:14 до 09:40 UT.

На рис. 2 показаны изменения магнитного поля на спутниках в СВ в полуденном и утреннем секторах магнитосферы в 9:00–11:00 UT. Данные наблюдений в СВ даны со сдвигом 10 мин, чтобы проще было сравнить форму колебаний в СВ и магнитосфере.

Таблица 2

Координаты наземных магнитометрических станций,
используемых для изучения меридионального распространения геомагнитных пульсаций

Аббревиатура	Сеть	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
THL	GrW	77.47	290.77	84.72	29.24
SVS		76.02	294.9	83.00	32.87
KUV		74.57	302.82	80.69	41.92
UPN		72.78	303.85	78.93	40.20
UMQ		70.68	307.87	76.38	42.58
GDH		69.25	306.47	75.25	39.39
ATU		67.93	306.43	73.99	38.19
STF		67.02	309.28	72.64	40.87
SKT		65.42	307.10	71.43	37.22
FHB		62.00	310.32	67.41	39.05
NAQ		61.16	314.56	65.75	43.19
IGC	USAE	69.30	278.20	78.43	-5.39
RPB		66.52	273.77	75.99	-13.51
CDC		64.20	283.40	73.47	3.04
T47		62.20	284.35	71.51	4.23
T53		60.82	281.85	70.39	0.08
T46		60.05	282.71	69.60	1.36
T44		58.47	281.92	68.14	-0.04
T31		56.50	280.80	66.31	-1.92
T52		53.79	282.38	63.54	0.26
T51		48.05	282.22	57.86	-0.43
OTT		45.40	284.45	54.98	2.52
RES	USAC	74.69	265.11	82.93	-35.54
GHC		68.63	264.15	77.54	-31.68
BLC		64.32	263.99	73.60	-30.06
RAN		62.82	267.89	72.45	-23.12
FCC		58.76	265.91	68.50	-25.59
GIM		56.38	265.36	66.16	-26.08
PIN		50.20	263.96	59.96	-27.43
C08		45.87	264.92	55.72	-25.69
T56		45.59	267.03	55.60	-22.65
YKC		62.48	245.52	69.42	-56.85
SMI	USAW	60.03	248.07	67.48	-52.27
FMC		56.66	248.79	64.28	-50.02
T36		54.71	246.69	61.95	-52.09
C06		53.35	247.03	60.64	-51.24
RED		52.14	246.16	59.25	-51.96
T43		50.87	245.70	57.86	-52.17
T03		50.37	247.02	57.60	-50.40
LET		49.64	247.13	56.88	-50.07

Сверху вниз показаны модуль B и B_{xyz} -компоненты магнитного поля. На рис. 3 показаны те же данные после полосовой фильтрации: видно, что фильтр не вносит фазовых искажений в исходные сигналы. Вариации в СВ на ThB, ThC и в полуденном секторе магнитосферы на Geotail (GL) похожи, из чего следует, что форма изменений поля в полуденном секторе в значительной степени обусловлена их проникновением из СВ.

Значение $V=186.4$ км/с (меньше $V_{CB}=550$ км/с) скорости УНЧ-волн было определено по фазовой задержке в колебаниях модуля вектора магнитного поля $|B|$ между спутниками ThC и ThB и расстоянию между ними. Мы оценили направление нормали ДС, фронт которой регистрировался в 09:10 UT (см. рис. 1). Параметры нормали рассчитывались методом смешан-

ных данных [Abraham-Shrauner, Yun, 1976] с использованием теоремы компланарности [Colburn, Sonett, 1966]

$$\mathbf{n} = \pm \frac{(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times ((\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2))}{|(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times ((\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2))|} \quad (1)$$

на основе которой определили скорость ДС

$$\mathbf{V}_{ДС} = \frac{(\rho_2 \mathbf{V}_2 - \rho_1 \mathbf{V}_1) \cdot \mathbf{n}}{\rho_2 - \rho_1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{V}_1$, ρ_1 , $\mathbf{B}_2$, $\mathbf{V}_2$, ρ_2 — магнитное поле, скорость, плотность плазмы перед фронтом ДС и за ним.

Нормаль к фронту ДС ориентирована в направлении Y-составляющей ($n=[0.1095, 0.912, 0.3953]$ в системе GSE-координат), значение скорости фронта ДС

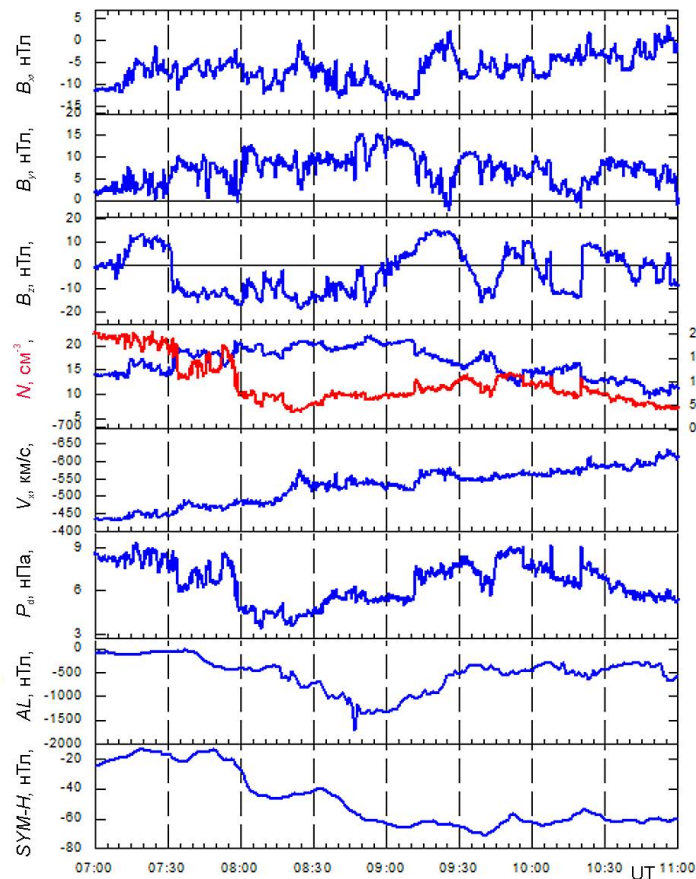


Рис. 1. Параметры плазмы и межпланетного магнитного поля в СВ: компонента ММП, его модуль B , концентрация ионов (а–г), V_x -компонента скорости ионов и динамическое давление СВ (д, е) по данным спутника THEMIS-B в событии 11.09.2015 в 07:00–11:00 UT, AL и $SYM-H$ (ж, з) для рассматриваемого интервала

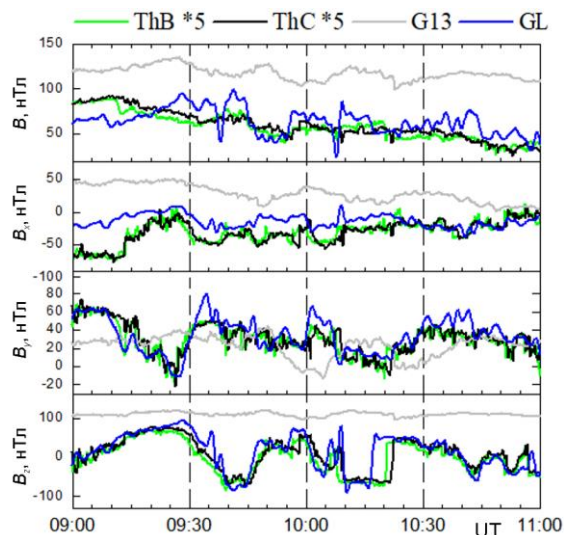


Рис. 2. Спутниковые измерения магнитного поля (модуль B и $B_{x,y,z}$ -компоненты магнитного поля в СВ (THEMIS-B, THEMIS-C) и магнитосфере (GEOTAIL и GOES-13). Данные в СВ сдвинуты на 10 мин и даны с повышающим коэффициентом

$V_{DC} = 182.8$ км/с хорошо согласуется со скоростью распространения УНЧ-волны в СВ, определенной выше по фазовым задержкам между спутниками. Наблюдаемые скорости распространения можно объяснить тем, что УНЧ-волны распространяются вверх по натекающему потоку в сторону Солнца и сносятся СВ к Земле.

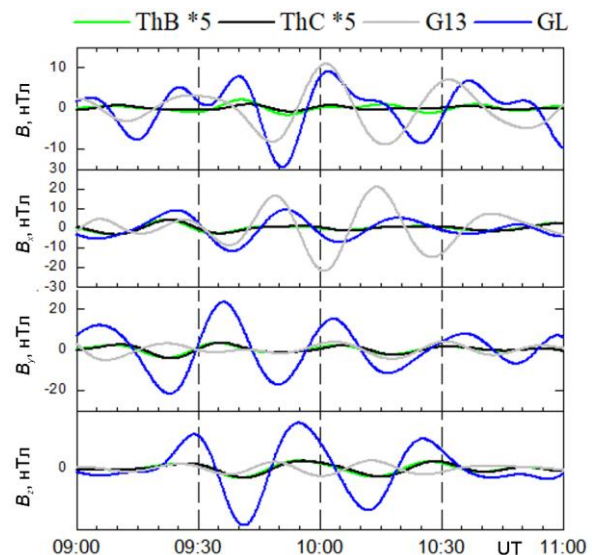


Рис. 3. Спутниковые измерения магнитного поля (модуль B и $B_{x,y,z}$ -компоненты магнитного поля в СВ (THEMIS-B, THEMIS-C) и магнитосфере (GEOTAIL и GOES-13) отфильтрованные в полосе 1000–2400 с. Данные в СВ сдвинуты на 10 мин и даны с повышающим коэффициентом

Вариации поля на GOES-13 (G13), расположенном в утреннем секторе, отличаются по частоте от наблюдаемых в полуденном секторе, и изучить распространение пульсаций по фазовым задержкам на этих спутниках не представляется возможным.

Таблица 3

Координаты спутников в магнитосфере 11.09.2015
в 10:00 UT в системе GSE

Спутники	GSE координаты, R_e		
	X	Y	Z
THEMIS-B	61.78	-20.97	-3.26
THEMIS-C	60.27	-24.56	-3.94
GEOTAIL	8.59	3.62	-0.02
GOES-13	-1.64	-5.94	-2.39
THEMIS-D	-4.61	-9.03	-2.09
GOES-15	-6.35	-1.85	-0.19
CLUSTER-4	-8.70	-2.71	-12.05
CLUSTER-2	-10.07	-2.00	-11.39

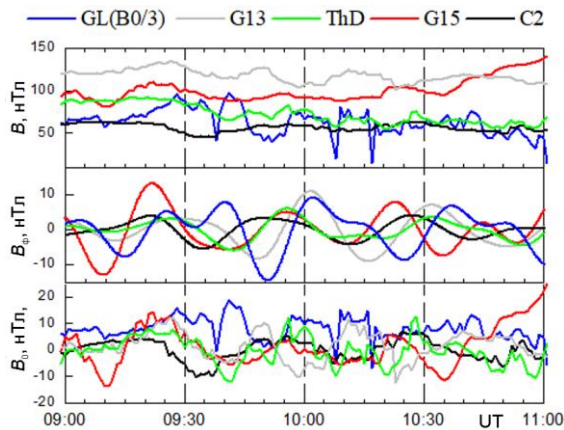


Рис. 4. Сверху вниз: модуль магнитного поля B , модуль магнитного поля B_ϕ , отфильтрованный в полосе 1000–2400 с, продольная компонента B_0 в координатах Mean Field Aligned в магнитосфере на спутниках GEOTAIL, GOES-13, THEMIS-D, GOES-15 и CLUSTER-2

На рис. 4 показаны модуль магнитного поля B , отфильтрованный модуль магнитного поля B_ϕ и продольная компонента B_0 в координатах Mean Field Aligned на спутниках, расположенных в секторе от утренних до полуночных часов местного времени. Показаны измерения спутников, расположенных в 10:00 UT в следующих секторах MLT: G13 (05 MLT), THEMIS-D (ThD, 04 MLT), GOES-15 (G15, 01 MLT) и CLUSTER-2 (C2, 02:30 MLT). Подобие формы колебаний в модуле поля на разных спутниках позволяет оценить скорости распространения с ночной на утреннюю сторону: скорость C2-ThD ~ 95 км/с, G15-G13 — ~ 113.7 км/с. Подобие формы пульсаций на нижней и средней панели позволяет говорить о значимом вкладе компрессионной компоненты СВ в геомагнитные пульсации, это подтверждается величиной B_0 -компоненты, максимальная амплитуда которой наблюдается в полуденном секторе, минимальная — в полуночном.

На рис. 5 показана динамика потоков в магнитосфере энергичных электронов $J_e = 30\text{--}50$ кэВ на G13 и G15, $J_e = 40$ кэВ на ThD и $J_e \gg 40$ кэВ на Cluster-4 (C4, 3 MLT). Видно, что на спутниках, кроме ThD, быстрые нарастания потоков сменяются более медленными спадами. Это обусловлено тем, что частицы посредством магнитного дрейфа постепенно покидают локализованную область, где они были инжектированы (на спутнике ThD скорости нарастания и спада потоков совпадают). Из фазовых задержек

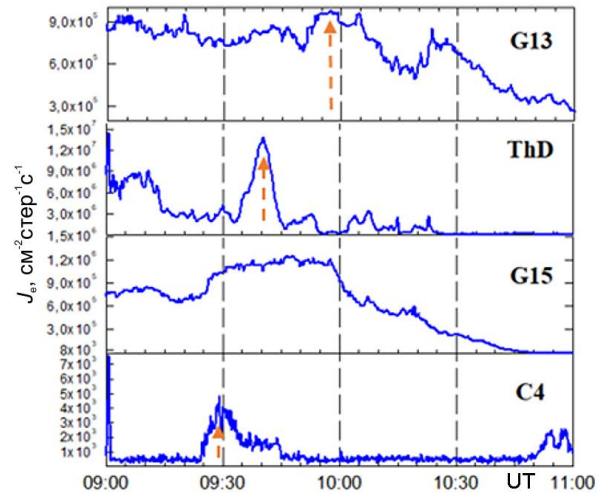


Рис. 5. Потоки энергичных $J_e = 30\text{--}50$ кэВ (GOES-13), 40 кэВ (THEMIS-D), 30–50 кэВ (GOES-15), $J_e > 40$ кэВ (CLUSTER-4)

вариаций в потоках (отмечены стрелками) можно сделать заключение о распространении энергичных J_e с ночной стороны на дневную со скоростями 39.3 (C4-ThD), 23.8 км/с (ThD-G13). Они близки скоростям распространения суббуревых инжекций 24 км/с, оцененных в [Reeves et al., 1996].

На рис. 6, а показаны фильтрованные вариации H -компоненты магнитометров, распределенных по азимуту на $\Phi' = 76^\circ\text{--}79^\circ$, справа — зависимость азимутальной скорости распространения от LT (δ), распределения ПТ, построенные с помощью ТИМ для отрицательной полуволны на магнитограммах на 09:50–10:00 UT (ϵ), для положительной полуволны в 10:05–10:20 UT (ζ), в нижней части — распределения эквивалентных ионосферных токов, построенные методом СЭТС в эти же моменты времени (δ , ϵ). Динамика вихрей с использованием этого метода была проанализирована с помощью программного кода, написанного в среде MatLab, [Vanhamäki, Juusola, 2020], доступного по ссылке [URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26732-2_2#Sec18]. Как следует из фазовых задержек магнитных пульсаций (панель а; максимумы, по которым анализировалось распространение, отмечены звездочками), они распространялись с дневной на ночную сторону со скоростями 3–9 км/с. На картах распределений ПТ ТИМ показаны втекающие (синий цвет) и вытекающие (красный цвет) ПТ (панели ϵ , ζ). Между слоями противоположных ПТ происходит усиление холловских токов западного направления в утреннем секторе и восточного направления — в вечернем (зеленая и черная стрелки соответственно на панели ζ). Такое расположение электроструй соответствует токовой системе DP2. На построенных картах распределений ПТ ТИМ можно видеть, что во время положительной полуволны западный ток имеет большую протяженность по долготе и можно сказать, что дополнительно к DP2 усиливается и токовая система DP1. СЭТС на панели δ показывает большой холловский вихрь, расположенный в утреннем секторе. Западный холловский ток на картах ТИМ соответствует нижней части этого вихря на $\Phi' = 70^\circ\text{--}80^\circ$. Согласно карте распределения ПТ в ионосфере, широтный максимум

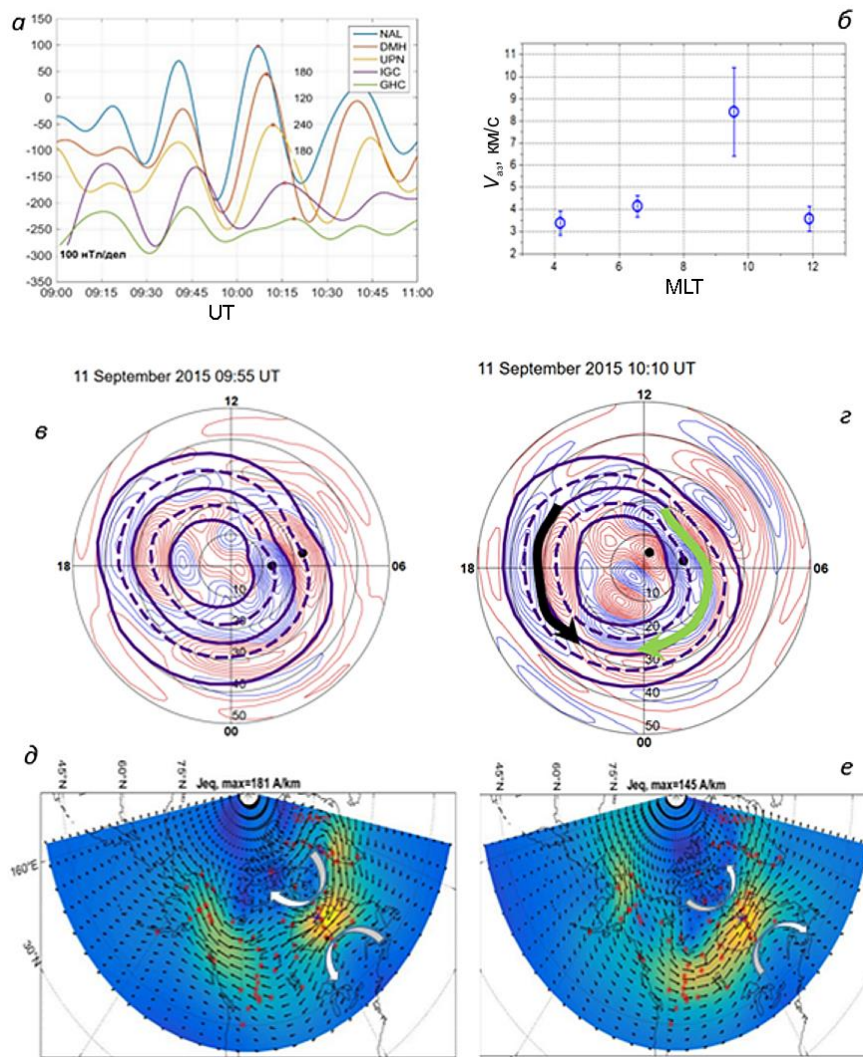


Рис. 6. H -компонента геомагнитного поля станций, распределенных по азимуту на исправленных геомагнитных широтах 76° – 79° , отфильтрованная в полосе 1000–2400 с (a); зависимость азимутальной скорости распространения вдоль широты $\Phi' = 76^{\circ}$ – 79° от MLT (b); распределения продольных токов с помощью ТИМ (c , d); распределения эквивалентных ионосферных токов по методу СЭТС (e , f) для отрицательной полуволны в 09:50–10:00 UT (c , e) и для положительной в 10:05–10:20 UT (d , f) геомагнитных P13-пульсаций (a)

западной электроструи лежит на широтах максимума ЭТС (на юге большого вихря) на границе между областями втекающих и вытекающих ПТ (области 1 и 2). Для отрицательной и положительной полуволн этот ток имеет разное направление вследствие противоположных направлений холловских токов внутри и вне вихря (направление показано белыми стрелками d , e). ЭТС противоположного направления регистрировались также во время глобальных Pc5-пульсаций [Huang, 2021].

Мы проанализировали динамику вихрей, обозначенных белыми стрелками (панель e): траектории вихрей, меридиональная и азимутальная скорости распространения показаны на рис. 7. Траектории смещения высокоширотного (a) и низкоширотного (b) вихрей располагаются вдоль границы раздела море—суша. Вихри распространяются вдоль меридиана к северу со скоростями 1.6–4 км/с (e). По азимуту регистрируются противоположные скорости распространения ± 25 км/с (z), из чего можно заключить, что по азимуту вихри не распространяются. Локализацию

вихрей вдоль границы раздела море—суша можно отнести к так называемым береговым эффектам.

Для изучения частотных спектров P13-пульсаций, их динамики в меридиональном направлении, а также для определения широт резонансов силовых линий, были выбраны четыре меридиональные цепочки наземных магнитных станций, координаты которых даны в табл. 2. Положение этих цепочек схематично представлено на рис. 8, b . На панели a показаны спектры мощности УНЧ-волн в СВ, спектры P13-пульсаций на Земле на разных широтах, зависимость меридиональной скорости распространения пульсаций от широты (b) и зависимость широт западной электроструи и резонансов силовых линий от MLT (z). Видно (a), что спектры колебаний в СВ и на Земле имеют общий пик на частоте 0.55 МГц (обозначен цифрой 1), он выражен во всех компонентах ММП и в скорости СВ. Пики на частотах 0.82 и 0.96 МГц (2, 3) на спектрограммах наземных станций имеют явную зависимость от широты: с максимальной интенсивностью наблюдаются на более высоких и более низких

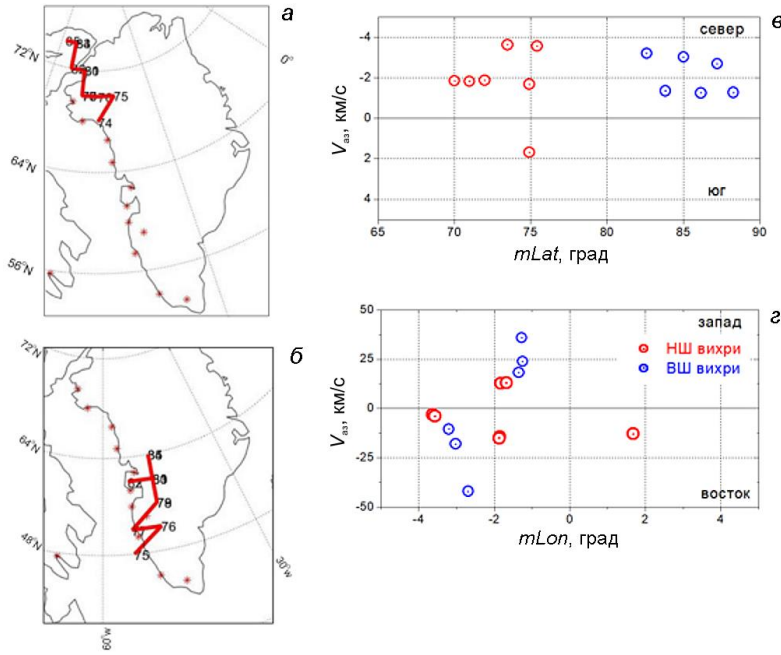


Рис. 7. Траектории вихрей на более высоких (а) и более низких (б) широтах и скорости перемещения вдоль этих траекторий по меридиану и азимуту (в, г) в 10:10–10:20 UT; НШ, ВШ — низкоширотные и высокоширотные вихри

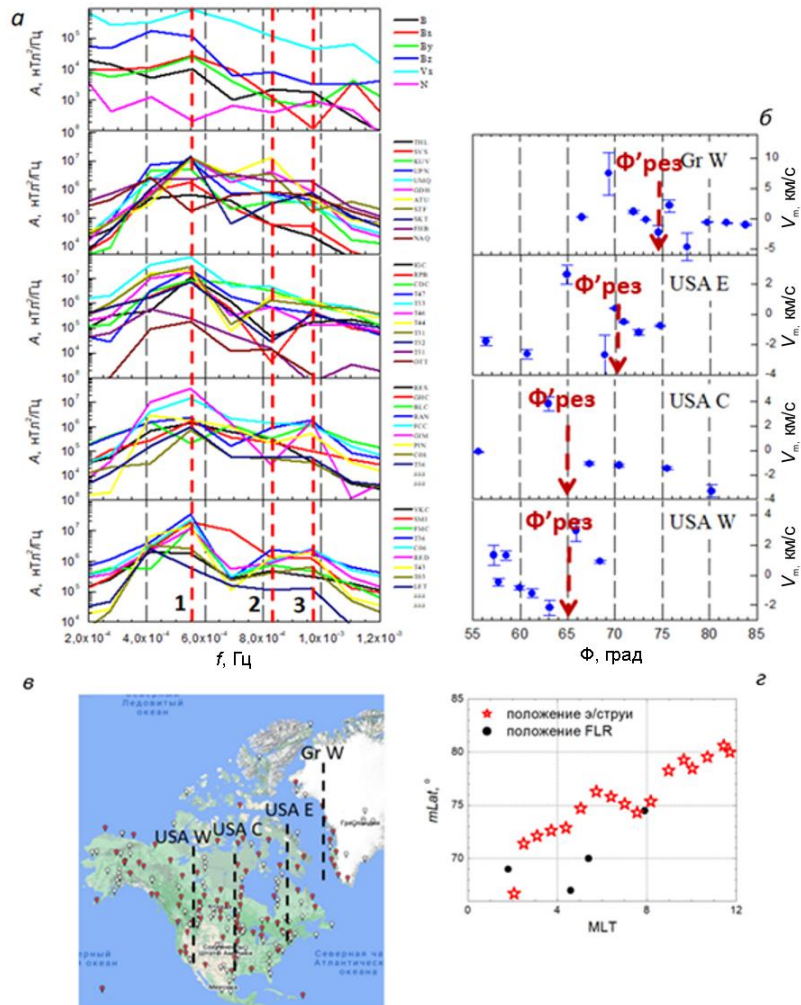


Рис. 8. Спектры УНЧ-волн в СВ, спектры Pi3-пульсаций на Земле на разных широтах, вдоль разных меридианов (а), меридиональные скорости распространения пульсаций вдоль разных меридианов (б), карта расположения меридиональных цепочек станций (в), зависимость геомагнитной широты западной электроструи и широты резонансов силовых линий от MLT (г)

широтах соответственно. Эти пики присутствуют также в спектрах параметров межпланетной среды B , B_z и N . Широта резонансных колебаний $\Phi'_{\text{рез}}$ силовых линий определялась с использованием методики [Glassmeier et al., 1999] по максимальной амплитуде и разности фаз колебаний вдоль меридиональной цепочки станций. На распределения меридиональных скоростей Pi3 -пульсаций вдоль этих меридианов нанесена $\Phi'_{\text{рез}}$. Видно, что преобладает распространение пульсаций вдоль меридиана к полюсу, которому соответствуют отрицательные значения скоростей 0.5–5 км/с, на $\Phi'_{\text{рез}}$ значения скоростей претерпевают разрыв. Положения западной электроструи и $\Phi'_{\text{рез}}$ совпадают (панель z).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, нами изучены частотный спектр и динамика глобальных Pi3 -пульсаций на высоких широтах и их эквивалентных токовых систем в магнитосфере и ионосфере в протяженном секторе долгот 0–12 MLT. Выявлено, что спектр пульсаций имеет три пика: на всех широтах на частоте 0.55 мГц, два пика на 0.82 и 0.96 мГц на более высокой и более низкой широтах соответственно. Обнаружена сходная динамика малых вихрей, являющихся тонкой структурой большого вихря, и пульсаций в ионосфере, но только вдоль меридиана, а также распространение пульсаций с дневной стороны на ночную в ионосфере и в противоположном направлении в магнитосфере. Обнаруженные особенности описаны ниже.

4.1. Внешний и внутримангнитосферный источник Pi3 -пульсаций

В [Parkhomov et al., 1998] подобно событию, рассматриваемому нами, в спектре Pc5 -пульсаций обнаружены два максимума: широтно-независимый на 2.3 мГц и зависящий от широты на 4–6 мГц. Авторы предположили, что колебания первого типа связаны с колебаниями магнитопаузы, колебания второго типа вызваны внутримангнитосферными резонансами. Граница БМЗ-волновода, колебания в котором обусловили первый пик, по их предположению, лежит снаружи магнитопаузы. В рассматриваемом нами событии широтно-независимый пик колебаний регистрировался на 0.55 мГц в СВ, при этом регистрировались УНЧ-волны 0.4–0.7 мГц. Зависящие от широты пики на 0.82 и 0.96 мГц на наземных магнитограммах присутствуют в спектрах ММП и концентрации. Это согласуется с выводами работы [Kerko, Spence, 2003], в которой при анализе ряда событий геомагнитных пульсаций, вызванных вариациями P_d , было обнаружено, что дискретные частоты внутримангнитосферных резонансов 0.7, 1.3, 1.9, 2.6 и 3.4 мГц наблюдаются в вариациях плотности СВ и, предположительно, отражают существование структур определенных размеров в межпланетной среде. Частоты колебаний в рассматриваемом нами событии близки первой гармонике внутримангнитосферных резонансов, деление на которые выполнено весьма условно.

В рассматриваемом нами событии реализуется несколько условий, благоприятных для проникно-

вления волн из СВ и генерации изменений поля в магнитосфере, регистрируемых глобально: экстремальные значения B_z ММП, вариации P_d (отношение $\Delta P_d/P_d \sim 0.5$), скорость СВ ~ 550 км/с. Одновременные изменения N и B типичны для компрессионных МГД-волн: быстрой магнитозвуковой (БМЗ) и медленной магнитозвуковой (ММЗ). В случае БМЗ-волны эти параметры изменяются в фазе, а в случае ММЗ-волны — в противофазе [Baumjohann, Treumann, 1996], что и наблюдается в нашем случае в межпланетной среде и магнитосфере. Альфеновская скорость СВ по данным ThV составляет ~ 90 км/с, что совпадает по порядку со скоростью УНЧ-волны в СВ (168 км/с), — таким образом, волны в СВ соответствуют ММЗ-волнам. Необходимо добавить, что альфеновские волны не проходят через тангенциальный разрыв, которым является магнитопауза, а МЗ-волны могут частично проникать через нее [Leonovich et al., 2003].

4.2. Динамика геомагнитных Pi3 -пульсаций и эквивалентных токовых вихрей

Наблюдения показывают, что пульсации на широтах $\Phi' = 76^\circ - 79^\circ$ распространяются по азимуту с дневной стороны на ночную с $V_{\text{аз}} = 3 - 9$ км/с, по меридиану пульсации распространяются в полюсном направлении с $V_m = 0.5 - 5$ км/с. Большой холловский вихрь диаметром ~ 3500 км, наблюдаемый в утреннем секторе, в целом неподвижен, однако в нем можно выделить малые вихри — так называемую тонкую структуру большого вихря диаметром 1000–1500 км. Малые вихри распространяются также к полюсу со сравнимыми скоростями 1.6–4 км/с.

В [Моисеев и др., 2024а, 6] исследовались меридиональное и азимутальное распространение геомагнитных пульсаций и ответственных за них малых TCV с периодами 5–10 мин. Сравнение скоростей распространения пульсаций и вихрей, полученное в этих работах и в настоящей работе, показало, что скорости распространения пульсаций и вихрей совпадают в меридиональном направлении, а в азимутальном вихри распространяются быстрее с $V = 5 - 25$ км/с, при этом TCV не испытывают берегового эффекта и распространяются по долготе в секторе протяженностью до 12 MLT. Оба явления и TCV и Pi3 имеют резонансный характер, однако, если в случае TCV отмечалось совпадение положения их центров с резонансами силовых линий (field line resonance (FLR)), то в случае Pi3 положение FLR совпадало с западной электрострой, являющейся нижней частью большого вихря.

В [Huang, 2021] при изучении глобальных Pc5 -пульсаций было обнаружено, что в азимутальном направлении пульсации не распространялись, изменение фазы вдоль меридиана авторы объяснили за счет эволюции токовой системы пульсаций. Большой вихрь в рассматриваемом событии также не распространяется, а чтобы понять различие в распространении Pi3 -пульсаций и малых вихрей, мы рассмотрели азимутальное распространение на тех же станциях (см. рис. 6, а) по D - и Z -компонентам. Анализ ком-

понент показал, что по ним не наблюдалось распространения (не показано), — возможно, это и объясняет разную динамику ЭТС и пульсаций, поскольку для построения ЭТС используются все компоненты.

Береговые эффекты в полярных сияниях [Самсонов, Зарецкий, 1963; Надубович, 1967] и ионосферных токах [Шпынев и др., 1977] активно исследовались по наблюдениям в Советской Арктике (район в Якутии с центром в б. Тикси) в период экспедиции СиБизМИР и ИКФиА СО АН СССР зимой 1968–1969 гг. Эти эффекты естественно связать с известным береговым эффектом Сенько—Мансурова [Сенько, 1959; Мансуров, 1959], который заключается в том, что индуцированные токи в море или участках Земли с повышенной электропроводностью благодаря скин-эффекту вытесняются к берегам или краям названных участков суши. Ионосферные эффекты заключались в увеличении плотности ионосферных токов в области береговой линии, а также в образовании регулярных вихревых структур в ионосферных токах. Ионосферная проекция этих явлений располагалась на суше ~100–200 км от границы раздела. СЭТС-метод позволил рассмотреть с одномоментным разрешением эволюцию малых ионосферных вихрей во времени и заключить, что положение вихрей на расстоянии от береговой линии ~200 км согласуется с полученными ранее результатами при исследовании береговых ионосферных эффектов. Авторы [Шпынев и др., 1977] утверждают, что в ионосферных береговых эффектах проявляются локальные неоднородности, имеющие пространственные масштабы ~100–300 км, на основании чего мы можем предположить, что малые вихри диаметром 1000–1500 км, отображаемые СЭТС-методом, существуют на самом деле.

4.3. Сопоставление спутниковых и наземных измерений

В [Моисеев и др., 2020] изучалось событие РіЗ-пульсаций, источником которых были вариации B_z ММП. В магнитосфере в интервале РіЗ-пульсаций по фазовым задержкам потоков энергичных электронов и на Земле по фазовым задержкам бухтообразных возмущений в риометрическом поглощении отмечалось распространение с ночной стороны на дневную. В настоящей работе по спутниковым и наземным наблюдениям отмечается противоположное распространение, ниже мы рассмотрим возможные причины этого.

Для сопоставления распространения пульсаций по наблюдениям на Земле и в магнитосфере наземные станции, расположенные вдоль широт $\Phi' = 76^\circ\text{--}79^\circ$ были спроецированы в экваториальную плоскость магнитосферы с помощью модели Цыганенко Ts04 [Tsyanenko, Sitnov, 2005]. Проекция наземных станций и положение спутников в экваториальной плоскости магнитосферы 11.09.2015 в 10:00 UT показаны на рис. 9. Видно, что минимальное расстояние между проекциями силовых линий, соответствующих наземным станциям, и положениями спутников составляет $\sim 5R_e$. Таким образом, наземные и спутниковые наблюдения могут охватывать разные области магнитосферы, поэтому и характер распространения пульсаций отличается.

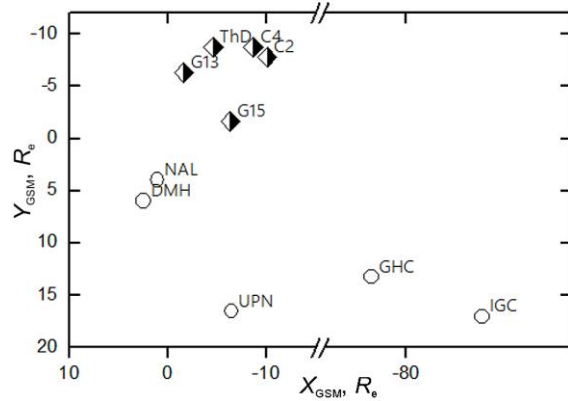


Рис. 9. Проекция наземных станций, расположенных вдоль исправленных геомагнитных широт $76^\circ\text{--}79^\circ$ (кружки) и положение спутников (ромбы) в экваториальной плоскости магнитосферы 11.09.2015 в 10:00 UT

Возможно также, что регистрируемый нами характер распространения отражает направление конвекции плазмы: с дневной стороны на ночную по наблюдениям на высоких широтах и в противоположном направлении в экваториальной плоскости магнитосферы. В пользу этого может свидетельствовать тот факт, что период пульсаций ~30 мин позволяет отнести их к Ps6-пульсациям, которые сопровождаются сияниями, имеющими форму, соответствующую букве Ω [Akasofu, Kimball, 1964]. В области этих сияний в экваториальной плоскости конвекция направлена к Солнцу, а на высоких широтах — в противоположном направлении. К сожалению, отсутствие наземных и спутниковых наблюдений сияний во время этого события не позволяет сделать окончательные выводы.

По наблюдениям на спутнике ThD мы оценили скорость электрического дрейфа (скорость конвекции) 75 км/с, сравнимую со скоростями распространения, оцененными по фазовым задержкам как в магнитном поле, так и в потоках энергичных электронов.

Между положениями проекций станций в экваториальной плоскости магнитосферы по модели Ts04 были оценены расстояния в XY-плоскости, а на основе наземных временных задержек — скорости распространения $V_{NAL_DMH} = 86$, $V_{DMH_UPN} = 734.2$, $V_{UPN_IGC} = 2074.7$, $V_{IGC_GNC} = 272.9$ км/с, индексами обозначены станции, между которыми измерялись скорости. Минимальное значение этих скоростей порядка скорости конвекции, а максимальное из значений близко альфеновской скорости 2225 км/с по данным спутника ThD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Распространение РіЗ-пульсаций и малых вихрей совпадает по величине и направлению вдоль меридиана. В азимутальном направлении вихри показывают наличие берегового эффекта. Сопоставление по спутниковым и наземным наблюдениям показывает, что распространение вихрей совпадает по направлению с конвекцией плазмы: с дневной стороны на ночную по наблюдениям на высоких широтах и в противоположном направлении в экваториальной

плоскости магнитосферы. В частотный спектр пульсаций вносят вклад и УНЧ-волны, проникающие из СВ, и магнитосферные резонансы.

Таким образом, можно заключить, что пульсации в данном событии были обусловлены как внешним (колебаниями в СВ), так и внутренним источниками (магнитосферным резонатором, который мог быть возбужден в том числе и суббурей). Динамика тонкой структуры большого вихря (малых вихрей) в магнитосфере в целом совпадает по скорости и направлению распространения с геомагнитными пульсациями.

Авторы благодарны руководителям следующих проектов за предоставление доступа к данным: проект SUPERMAG, в том числе сеть IMAGE, (PI Liisa Juusola), GREENLAND COAST CHAIN data, (PI Anna N. Willer), Themis, CANMOS, Geomagnetism Unit of the Geological Survey of Canada; GIMA; Intermagnet; USGS, а также набор данных спутниковых наблюдений из CDAWEB (D.J. McComas, R. Lepping, K. Ogilvi, G. Paschmann).

Результаты получены с использованием данных магнитометрического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>]. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН и ИСЗФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. *Геомагнитные вариации и бури*. Новосибирск: Наука, 1979, 248 с.
- Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Фрактальная структура гелиосферного плазменного слоя на орбите Земли. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2005, т. 45, № 3, с. 347.
- Лунюшкин С.Б., Пенских Ю.В. Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2019, т. 5, № 2, с. 97–113. DOI: [10.12737/szf-52201913](https://doi.org/10.12737/szf-52201913) / Lunyushkin S.B., Pensikh Y.V. Diagnostics of auroral oval boundaries on the basis of the magnetogram inversion technique. *Sol.-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, no. 2, pp. 97–113. DOI: [10.12737/stp-52201913](https://doi.org/10.12737/stp-52201913).
- Мансуров С.М. *Магнитные возмущения*. М.: Изд-во АН СССР, 1959, № 1, с. 64–71.
- Моисеев А.В., Стародубцев С.А., Мишин В.В. Особенности возбуждения и распространения по азимуту и меридиану длиннопериодных Pi3-колебаний геомагнитного поля 8 декабря 2017 г. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 3, с. 56–72. DOI: [10.12737/szf-63202007](https://doi.org/10.12737/szf-63202007) / Moiseev A.V., Starodubtsev S.A., Mishin V.V. Features of excitation and azimuthal and meridional propagation of long-period Pi3 oscillations of the geomagnetic field on December 8, 2017. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 3, pp. 56–72. DOI: [10.12737/stp-63202007](https://doi.org/10.12737/stp-63202007).
- Моисеев А.В., Попов В.И., Стародубцев С.А. Сравнительный анализ распространения магнитных вариаций и эквивалентных токовых вихрей геомагнитных Pc5-пульсаций по меридиану и азимуту. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2024а, т. 64, № 4, с. 548–566. DOI: [10.31857/S0016794024040093](https://doi.org/10.31857/S0016794024040093).
- Моисеев А.В., Попов В.И., Стародубцев С.А. Исследование особенностей азимутального распространения геомагнитных Pc5-пульсаций и их эквивалентных токовых вихрей по данным наземных и спутниковых наблюдений. *Солнечно-земная физика*. 2024б, т. 10, № 3, с. 104–115. DOI: [10.12737/szf-103202412](https://doi.org/10.12737/szf-103202412) / Moiseev A.V., Popov V.I., Starodubtsev S.A. Investigating azimuthal propagation of Pc5 geomagnetic pulsations and their equivalent current vortices from ground-based and satellite data. *Sol.-Terr. Phys.* 2024b, vol. 10, no. 3, pp. 104–115. DOI: [10.12737/stp-103202412](https://doi.org/10.12737/stp-103202412).
- Надубович Ю.А. *Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Полярные сияния*. М.: Наука, 1967, № 14, с. 77.
- Пархомов В.А., Борождкова Н.Л., Еселевич В.Г. и др. Особенности воздействия диамагнитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли. *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 4, с. 47–62. DOI: [10.12737/szf-34201705](https://doi.org/10.12737/szf-34201705) / Parhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., et al. Features of the impact of the solar wind diamagnetic structure on Earth's magnetosphere. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 4, pp. 47–62. DOI: [10.12737/stp-34201705](https://doi.org/10.12737/stp-34201705).
- Пенских Ю.В. Применение метода наибольших вкладов в технике инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 4, с. 67–76. DOI: [10.12737/szf-64202009](https://doi.org/10.12737/szf-64202009) / Pensikh Y.V. Applying the method of maximum contributions to the magnetogram inversion technique. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 4, pp. 67–76. DOI: [10.12737/stp-64202009](https://doi.org/10.12737/stp-64202009).
- Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 2, с. 63–76. DOI: [10.12737/szf-72202106](https://doi.org/10.12737/szf-72202106) / Pensikh Yu.V., Lunushkin S.B., Kapustin V.E. Geomagnetic method for automatic diagnostics of auroral oval boundaries in two hemispheres of Earth. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, no. 2, pp. 57–69. DOI: [10.12737/stp-72202106](https://doi.org/10.12737/stp-72202106).
- Самсонов В.П., Зарецкий Н.С. Азимутальное и географическое распределения авроральных лучей. *Геомагнетизм и аэрномия*. 1963, т. 3, № 2, с. 246.
- Сенько П.К. Береговой эффект в магнитных вариациях. М.: 1959, 61 с.
- Шпынев Г.Б., Мишин В.М., Мишин Е.В. *Исследования по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца*. М.: Наука, 1977, вып. 43, с. 3–13.
- Abraham-Shrauner B., Yun S.H. Interplanetary shocks seen by AMES plasma probe on Pioneer 6 and 7. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, pp. 2097–2102.
- Akasofu S.I., Kimball D.S. The dynamics of the aurora: I. Instabilities of the aurora. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1964, vol. 26, pp. 205–211.
- Alimaganbetov M., Streltsov A.V. ULF waves observed during substorms in the solar wind and on the ground. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 181, pp. 10–18.
- Baumjohann W., Treumann R.A. *Basic Space Plasma Physics*. Imperial College Press, London, 1996.
- Colburn D.S., Sonett C.P. Discontinuities in the solar wind. *Space Sci. Rev.* 1966, vol. 5, pp. 439–506. DOI: [10.1007/BF00240575](https://doi.org/10.1007/BF00240575).
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, no. A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).
- Glassmeier K.-H., Othmer C., Gramm R., et al. Magnetospheric field-line resonances: A comparative planetology approach. *Earth Environment Sci.* 1999, vol. 20, pp. 61–109.
- Hada T., Kennel C.F. Nonlinear evolution of slow waves in the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1985, vol. 90, p. 531.
- Han D.-S., Yang H.-G., Chen Z.-T., et al. Coupling of perturbations in the solar wind density to global Pi3 pulsations: A case study. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A05217. DOI: [10.1029/2006JA011675](https://doi.org/10.1029/2006JA011675).
- Huang C.-S. Global Pc5 pulsations from the polar cap to the equator: Wave characteristics, phase variations, disturbance current system, and signal transmission. *J. Geophys. Res.* 2021, vol. 126, e2020JA029093. DOI: [10.1029/2020JA029093](https://doi.org/10.1029/2020JA029093).
- Kepko L., Spence H.E. Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind den-

- sity variations. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, p. 1257. DOI: [10.1029/2002JA009676](https://doi.org/10.1029/2002JA009676).
- Leonovich A.S., Mishin V.V., Cao J.B. Penetration of magnetosonic waves into the magnetosphere: Influence of a transition layer. *Ann. Geophys.* 2003, vol. 21, pp. 1083–1093.
- Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications. *Space Sci. Rev.* 1990, vol. 53, no. 1-2, pp. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).
- Parkhomov V.A., Mishin V.V., Borovik L.V. Long-period geomagnetic pulsations caused by the solar wind negative pressure impulse on March 22, 1979 (CDAW-6). *Ann. Geophys.* 1998, vol. 16, pp. 134–139.
- Reeves G.D., Henderson M.G., McLachlan P.S., et al. Radial propagation of substorm injections. *Proc. the Third International Conference on Substorms*. Eur. Space Agency Spec. Publ. 1996, ESA SP-389. p. 579.
- Saito T. Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1969, vol. 10, iss. 3, pp. 319–412.
- Saito T. Long-period irregular magnetic pulsation Pi3. *Space Sci. Rev.* 1978, vol. 21, pp. 427–467. DOI: [10.1007/BF00173068](https://doi.org/10.1007/BF00173068).
- Saito T., Matsushita S. Geomagnetic pulsations associated with sudden commencements and sudden impulses. *Planetary Space Sci.* 1967, vol. 15, pp. 573–587.
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A03208. DOI: [10.1029/2004JA010798](https://doi.org/10.1029/2004JA010798).
- Vanhamäki H., Juusola L. Introduction to spherical elementary current systems. *Ionospheric Multi-Spacecraft Analysis Tools*. 2020, vol. 17, pp. 5–33. DOI: [10.1007/978-3-030-26732-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26732-2_13).
URL: <https://supermag.jhuapl.edu/mag/> (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26732-2_2#Sec18 (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- URL: <http://ckprf.ru/ckp/3056> (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.
- Как цитировать эту статью:
Моисеев А.В., Попов В.И., Мишин В.В., Пенских Ю.В. Особенности распространения в системе магнитосфера—ионосфера компрессионных длиннопериодных колебаний, проникающих из межпланетной среды. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 65–76. DOI: [10.12737/szf-113202508](https://doi.org/10.12737/szf-113202508).