
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АЗИМУТАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ГЕОМАГНИТНЫХ Pc5-ПУЛЬСАЦИЙ
И ИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТОКОВЫХ ВИХРЕЙ
ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

**INVESTIGATING AZIMUTHAL PROPAGATION
OF Pc5 GEOMAGNETIC PULSATIONS
AND THEIR EQUIVALENT CURRENT VORTICES
FROM GROUND-BASED AND SATELLITE DATA**

А.В. Моисеев

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

В.И. Попов

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

С.А. Стародубцев 

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.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*

S.A. Starodubtsev

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

Аннотация. По фазовым задержкам на пространственно-разнесенных станциях, а также по данным спутниковых наблюдений в магнитосфере в двух событиях исследовалось азимутальное распространение резонансных всплесков геомагнитных пульсаций в диапазоне Pc5. Во время этих событий рассматривается также распространение эквивалентных токовых вихрей. Обнаружено, что пульсации по наблюдениям в магнитосфере и ионосфере, и эквивалентные токовые вихри в ионосфере распространяются в азимутальном направлении с дневной стороны на ночную. Скорости распространения по наземным наблюдениям составляют 5–25 км/с, по спутниковым — 114–236 км/с. Последние не превышают альфвеновскую скорость 620–1006 км/с в магнитосфере. По данным разных приборов на спутнике в одном из событий одновременно присутствуют сигнатуры быстрой магнитозвуковой и альфвеновской волн, что наглядно отображает процесс трансформации этих волн. Геомагнитная широта регистрации центров вихрей совпадает с широтой максимальной амплитуды геомагнитных пульсаций (резонансов силовых линий) и уменьшается на величину $\sim 15^\circ$ по направлению к ранним часам MLT. Предполагается, что наблюдаемая динамика Pc5-пульсаций и вихрей отражает распространение МГД-волны в магнитосфере.

Ключевые слова: геомагнитные Pc5-пульсации, эквивалентные токовые вихри, азимутальное распространение, волновые возмущения в параметрах плазмы и геомагнитном поле в диапазоне Pc5 в магнитосфере.

Abstract. Using phase delays at spaced stations and satellite observations in the magnetosphere during two events, we have studied azimuthal propagation of resonant bursts of geomagnetic pulsations in the Pc5 range. We have also examined propagation of equivalent current vortices during these events. It has been found that the pulsations, observed in the magnetosphere and ionosphere, and the equivalent current vortices in the ionosphere propagate in the azimuthal direction from the dayside to the nightside. Propagation velocities according to ground-based observations are 5–25 km/s; according to satellite observations, 114–236 km/s. Propagation velocities according to satellite observations do not exceed the Alfvén velocity in the magnetosphere, which is 620–1006 km/s. According to data from various instruments, there are signatures of fast magneto-sonic and Alfvén waves at a time in one of the events on the satellite. This clearly reflects the transformation of these waves. The geomagnetic latitude of registration of vortex centers coincides with the latitude of the maximum amplitude of geomagnetic pulsations (field line resonances) and decreases by $\sim 15^\circ$ toward the early hours of MLT. The observed dynamics of Pc5 pulsations and vortices is assumed to reflect MHD wave propagation in the magnetosphere.

Keywords: geomagnetic Pc5 pulsations, equivalent current vortices, azimuthal propagation, wave disturbances in plasma parameters and geomagnetic field in Pc5 pulsations in the magnetosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ультранизкочастотные (УНЧ) волны в диапазоне Pc5 играют важную роль в динамике магнитосферы [Saito, 1978]. УНЧ-волны, возбуждаемые на границе магнитосферы или в солнечном ветре (СВ), переносят энергию во внутреннюю магнитосферу, где возбуждаются собственные резонансные колебания (field line resonance, FLR). Источниками FLR считаются моды магнитосферной полости (волновода), возбуждаемые импульсами динамического давления P_d СВ [Allan et al., 1986; Wright, 1994; Chelpanov et al., 2022] или неустойчивостью Кельвина—Гельмгольца на флангах магнитосферы [Southwood, 1974; Chen, Hasegawa, 1974; Мишин, Матюхин, 1986; Mann et al., 2002].

При выполнении проекта Themis стали доступны данные синхронных спутниковых и наземных наблюдений, в результате появилась возможность изучения типов УНЧ-волн, возбуждаемых в магнитосферно-ионосферной системе, а также определения их направления и скорости распространения [Zhang et al., 2022]. Источником УНЧ-волн являются пространственно-временные вариации интенсивности трехмерных токовых систем [Saito, 1969; Motoba et al., 2002]. Частным случаем токовых систем УНЧ-волн являются движущиеся вихри конвекции (travelling convection vortices, TCV) [Friis-Christensen et al., 1988; Glassmeier, 1992]. Источником TCV считается локальное воздействие на дневную магнитопаузу [Korotova et al., 2004] за счет импульсов P_d или импульсного пересоединения на магнитопаузе — явления переноса потока (flux transfer event, FTE). TCV распространяются в основном на запад по азимуту в утреннем секторе, однако, как показано в статистическом исследовании [Zesta et al., 2002], могут распространяться и на восток. Исследование TCV на основе сферических элементарных токовых систем (метода, использованного в настоящем исследовании) проведено в [Amm et al., 2002]: авторы оценили скорость и направление распространения пары TCV, плотность эквивалентных ионосферных и продольных токов. В [Чинкин и др., 2020] авторы исследовали динамику TCV на основе разработанного ими метода расчета эквивалентных ионосферных токов (ЭИТ). Изучение распространения TCV по фазовым задержкам магнитных импульсов проводилось в [Friis-Christensen et al., 1988; Lühr et al., 1996]. Однако нам не известны работы, в которых бы сравнивались азимутальные скорости распространения TCV, полученные как по фазовым задержкам магнитных импульсов, так и по перемещению центров вихрей.

Целью работы является сравнение распространения геомагнитных Pc5-пульсаций и центров вихрей ЭИТ, возбуждаемых во время этих пульсаций в азимутальном направлении, по наземным и спутниковым наблюдениям. Для анализа были выбраны два события всплесков геомагнитных пульсаций в диапазоне Pc5 15.02.2011 и 12.01.2008.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для изучения азимутального распространения геомагнитных Pc5-пульсаций и эквивалентных токовых вихрей использовались данные геомагнитных наблюдений из известной базы данных SUPERMAG [Gjerloev, 2012; <http://supermag.jhuapl.edu/mag>]. Координаты станций, используемых для изучения распространения Pc5-пульсаций и эквивалентных токовых вихрей, приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Измерения на спутниках THEMIS использовались из базы данных CDAWEB [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>]. Координаты спутников в магнитосфере даны в табл. 3. Для изучения распространения использовались данные наземных станций с временным разрешением 60 с, поскольку расстояние между станциями по азимуту было >500 км, а длительность фазовых задержек сигналов ≥ 60 с. Временное разрешение спутниковых данных составляло 3 с.

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

В данной работе сравнивались скорости распространения по азимуту, полученные двумя методами: по фазовым задержкам магнитных вариаций на станциях (метод 1) и по перемещению вихрей ЭИТ (метод 2).

Расположение станций глобальной сети позволило проанализировать азимутальное распространение вдоль геомагнитных широт $57^\circ\text{--}60^\circ$, $65^\circ\text{--}66^\circ$ и $68^\circ\text{--}71^\circ$.

Расчеты обоими методами осуществлялись в пакете Matlab. При этом метод 1 заключался в применении функции findpeaks [<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/findpeaks.html>] к интервалу фильтрованных в диапазоне Pc5 ($T=150\text{--}600$ с) данных. С использованием данной функции в обрабатываемом временном интервале определялось время регистрации характерного максимума сигналов, полученных с соседних станций, и оценивался фазовый сдвиг между ними. Определив расстояние между станциями, разнесенными по долготе, соответственно методике, изложенной в [Макаров и др., 2002], и зная фазовую задержку пульсаций между ними, можно определить скорости распространения.

Метод 2 позволяет строить двумерные сферические элементарные токовые системы, описывающие эквивалентную плотность тока на вычислительной сетке [Vanhamäki, Juusola, 2020]. Возмущение магнитного поля Земли описывается наложением магнитного поля бездивергентных ионосферных элементарных токовых систем. На основе амплитуд этих систем определяются ЭИТ. Метод позволил проанализировать распределение токов в интервалы наблюдения геомагнитных Pc5-пульсаций и оценить положение вихрей ЭИТ. Расстояния между их положениями и скорости распространения определялись по геомагнитным координатам центров вихрей по широте и долготе через каждые 60 с.

Определенные таким образом значения скоростей перемещения вихрей сравнивались со скоростями распространения геомагнитных пульсаций Pc5.

Таблица 1

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

Усредненная широта	Аббревиатура	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
68–71	BJN	74.50	19.20	71.89	107.71
	SCO	70.48	338.03	71.63	71.82
	SKT	65.42	307.1	71.43	37.22
	CDC	64.2	283.4	73.47	3.04
	INK	68.25	226.7	71.5	-83.05
	BRW	71.3	203.25	70.6	-106.57
	GHB	62.00	310.32	67.41	39.05
	IQA	63.75	291.48	72.21	15.58
	FCC	58.76	265.92	68.5	-25.57
	YKS	62.48	245.52	69.42	-56.85
65–67	DED	211.21	211.21	70.87	-99.27
	MAS	69.46	23.70	66.65	106.36
	KEV	69.76	27.01	66.82	109.22
	TRO	69.66	18.94	67.07	102.77
	AND	69.30	16.03	66.86	100.22
	LRV	64.18	338.30	65.01	66.72
	NAQ	61.16	314.56	65.75	43.19
	T29	58.10	291.60	66.70	14.25
	T31	56.50	280.80	66.31	-1.92
	GIM	56.38	265.36	66.16	-26.08
57–60	RAL	58.22	256.32	67	-40.08
	FSP	61.76	238.77	67.47	-64.89
	MEK	62.77	30.97	59.57	108.66
	SOL	61.08	4.84	58.82	86.25
	LER	60.13	358.82	58.20	80.96
	OUJ	64.52	27.23	61.47	106.27
	LYC	64.61	18.75	61.87	99.33
	RVK	64.94	10.99	62.61	93.27
	T28	53.3	299.5	60.49	23.61
	T32	49.40	277.70	59.52	-6.97
	PIN	50.2	263.96	59.96	-27.43
	MEA	54.62	246.65	61.85	-52.1
	C12	49.69	256.20	58.49	-38.32
RED	52.14	246.16	59.25	-51.96	
T37	53.8	237.2	59.16	-63.14	
T22	56.83	226.84	60.09	-75.54	

Динамика вихрей ЭИТ была проанализирована с помощью программного кода, написанного в среде Matlab, прилагавшегося к статье [Vanhamäki, Juusola, 2020], доступного по ссылке [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26732-2_2#Sec18]. При этом центр вихря, как и в [Чинкин и др., 2020], определялся по экстремумам функции

$$\mathbf{G}(x, y) = \text{rot}(\mathbf{J}/|\mathbf{J}|), \tag{1}$$

где \mathbf{J} — горизонтальный ионосферный ток.

Метод 1 позволяет оценивать фазовые скорости распространения пульсаций, метод 2 — определить групповые скорости распространения вихрей.

Для выделения Pc5-пульсаций из геомагнитных данных мы использовали цифровой, полосно-пропускающий фильтр, подробно описанный в [Хемминг, 1980],

$$y_n = \sum_{k=-M}^M c_k x_{n-k}. \tag{2}$$

Здесь c_k — коэффициенты фильтра; k — число ко-

эффициентов фильтра; x — значения исходной реализации; y — значения, полученные в результате фильтрации; n — количество измерений; M — заданное максимальное число коэффициентов фильтра. Коэффициенты фильтра c_k связаны с его амплитудно-частотной характеристикой $H(\omega)$ обратным преобразованием Фурье:

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\omega) \exp(j\omega k) d\omega, \tag{3}$$

$$\omega = 2\pi\nu, j = \sqrt{-1}$$

для частот $\nu_1 < \nu < \nu_2 = 1/(2\Delta t)$, Δt — шаг дискретизации данных; $\omega = 2\pi\nu$.

Коэффициенты фильтра подбирались таким образом, чтобы полоса пропускания амплитудно-частотной характеристики соответствовала периодам Pc5-пульсаций в диапазоне 150–600 с и пульсации на плато фильтра не превышали 1 %.

Таблица 2

Координаты наземных магнитометрических станций,
используемых для изучения динамики вихрей эквивалентных ионосферных токов

Аббревиатура	Сеть	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты		
		широта	долгота	широта	долгота	
NAL	Im	78.92	11.95	76.57	109.96	
LYR		78.20	15.83	75.64	111.03	
HOR		77.00	15.60	74.52	108.72	
SOR		70.54	22.22	67.8	106.04	
HOP		76.51	25.01	73.53	114.59	
BJN		74.50	19.20	71.89	107.71	
NOR		71.09	25.79	68.19	109.28	
SOR*		70.54	22.22	67.80	106.04	
KEV		69.76	27.01	66.82	109.22	
IVA		68.56	27.29	65.60	108.61	
MUO		68.02	23.53	65.19	105.23	
SOD		67.37	26.63	64.41	107.33	
THL		Gr	77.47	290.77	84.72	29.24
SVS	76.02		294.9	83	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	
GHB	64.17		308.27	69.98	37.85	
FHB	62.00		310.32	67.41	39.05	
NAQ	61.16		314.56	65.75	43.19	
RES	USA E-Gr		74.69	265.11	82.93	-35.54
TAL		69.54	266.45	78.51	-27.95	
GHC		68.6	264.10	77.51	-31.76	
BLC		64.33	263.97	73.61	-30.09	
RAN		62.82	267.89	72.45	-23.12	
FCC		58.76	265.92	68.5	-25.57	
GIM		56.38	265.36	66.16	-26.08	
ISL		53.86	265.34	63.70	-25.79	
PIN		50.2	263.96	59.96	-27.43	
CBB		USA C-E	69.1	255.00	77.04	-47.75
YKC			62.48	245.52	69.42	-56.85
SMI			60.02	248.05	67.47	-52.29
FMC			56.66	248.79	64.28	-50.02
MEA	54.62		246.65	61.85	-52.1	
ROT	51.07		245.87	58.1	-52.01	
C06	53.35		247.03	60.64	-51.24	
RED	52.14		246.16	59.25	-51.96	
LET	49.64		247.13	56.88	-50.07	
NEW	48.27		242.88	54.65	-54.82	
T19	47.61		245.33	54.45	-51.74	
T25	45.14		241.07	51.06	-56.04	
IGC	USA W-C		69.30	278.20	78.43	-5.39
CY0		70.5	291.4	78.52	18.88	
RPB		66.50	273.80	75.99	-13.55	
CDC		64.20	283.40	73.47	3.04	
T29		58.10	291.60	66.70	14.25	
T31		56.50	280.80	66.31	-1.92	
T32		49.40	277.70	59.52	-6.97	
T51		48.05	282.22	57.62	-0.74	
OTT		45.40	284.45	54.81	2.25	

Координаты спутников в магнитосфере в системе GSM для каждого события

№	Дата	UT	Спутники	GSM координаты, R_c		
				X	Y	Z
1	12.01.2008	08:00	Themis C	-7.05	-8.45	-2.26
			Themis D	-9.89	-5.32	-3.50
			Themis E	-9.97	-4.34	-3.60
2	15.02.2011	07:00	Themis D	-4.99	-4.41	-0.67
			Themis E	-5.13	-5.51	-0.74
			Themis A	-5.27	-6.03	-0.82

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 показаны данные измерений параметров плазмы (концентрация и скорость ионов, $a-z$) и магнитного поля в магнитосфере ($\delta-z$) по данным спутников THEMIS D, E, A (ThD, ThE, ThA) в событии 15.02.2011. Параметры плазмы и магнитного поля на разных спутниках показаны разными цветами и штриховкой. Внизу (u) показаны вариации H -компоненты по данным наземных станций, расположенных в области проекций силовых линий этих спутников. Видно, что в этом событии пульсации с периодом ~ 6 мин на Земле начались в 06:54–06:56 UT (u). Совпадающие по периоду пульсации в магнитном поле и скорости ионов на спутниках, расположенных на ночной стороне вблизи геостационарной орбиты, начались примерно в это же время ($\delta-z$).

Фазовые задержки сигнала на наземных станциях и на разных спутниках соответствовали распространению по направлению в хвост магнитосферы (в антисолнечном направлении). Вследствие того, что пульсации в компонентах скорости являются более регулярными по сравнению с пульсациями в магнитном поле, мы использовали их для определения фазовых задержек сигнала. Вариации магнитного поля использовались нами при изучении поляризации пульсаций. Примерно так же выглядели пульсации по спутниковым и наземным наблюдениям и в событии 12.01.2008. Необходимо отметить, что изучаемые нами Pc5-пульсации регистрировались локально в секторе 00:00–12:00 MLT (от полуночных до полуденных часов).

Для наглядного объяснения характера распространения Pc5-пульсаций на рис. 2 показан азимутальный профиль H -компоненты поля на магнитных широтах $65^\circ-66^\circ$ в событии 15.02.2011. Станции расставлены по степени уменьшения геомагнитной долготы с востока на запад. Данные отфильтрованы в диапазоне Pc5. Выбранные для определения фазовых задержек максимумы обозначены звездочками, рядом с которыми показаны значения задержек в секундах. Видно, что распространение происходит на запад.

На рис. 3 показаны распределения ЭИТ на выбранных станциях: Im (a), Gr (δ), USA E-Gr (ϵ), USA C-E (z), USA W-C (δ). Станции для анализа азимутальной динамики вихрей выбирались так, чтобы обеспечивалось двумерное покрытие. Видно, что вихри перемещались в основном по азимуту в западном направлении, однако на сети USA C-E (z) вихрь сместился в северо-восточном направлении.

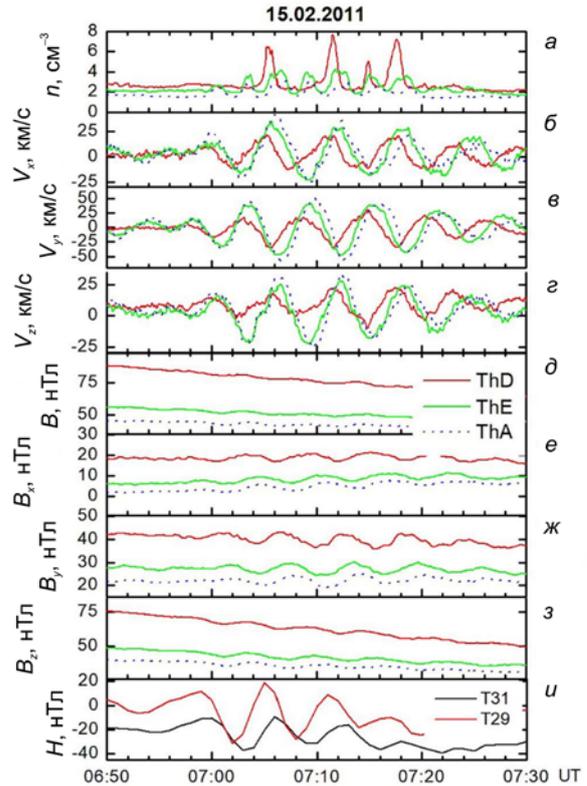


Рис. 1. Параметры среды в магнитосфере, измеренные на THEMIS: концентрация ионов (a), V_x , V_y , V_z -компоненты скорости ионов ($\delta-z$); B_x , B_y , B_z -компоненты геомагнитного поля ($\delta-z$); вариации H -компоненты геомагнитного поля на наземных станциях (u)

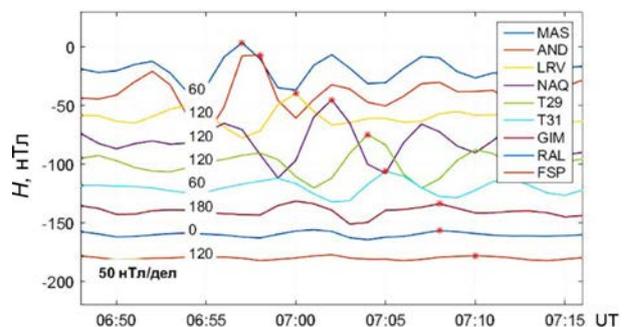
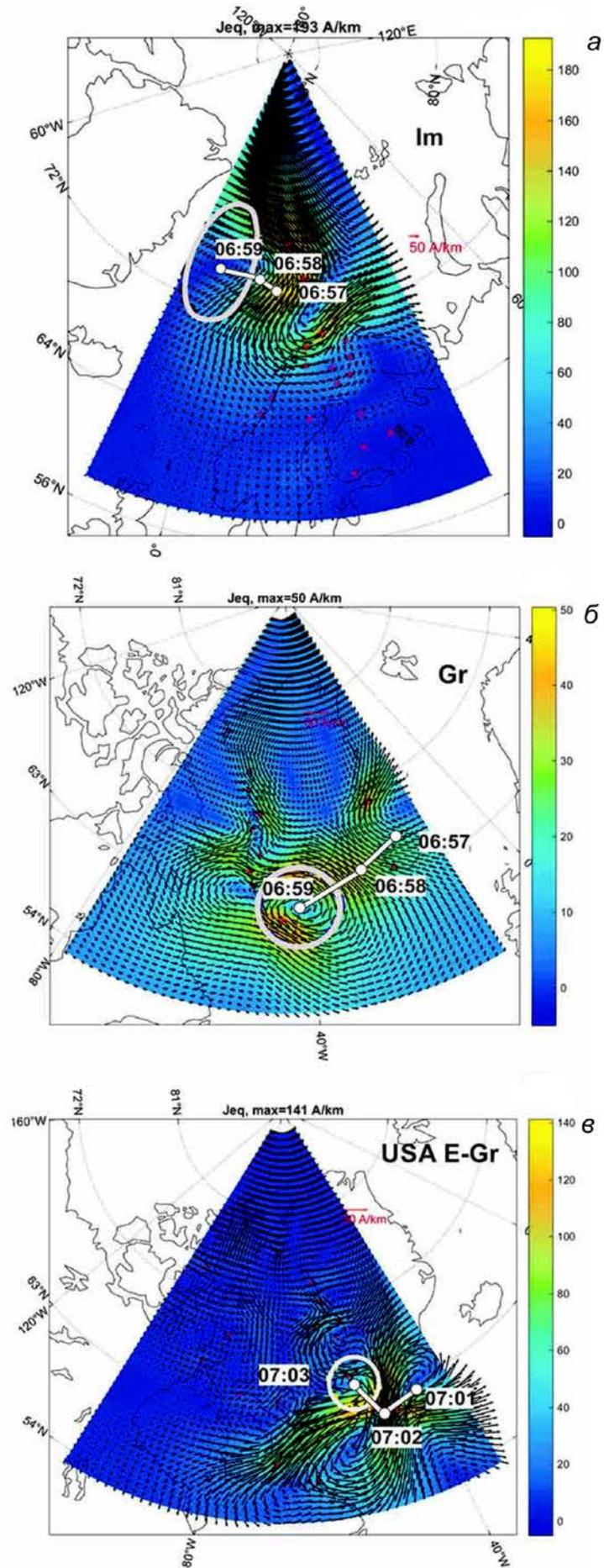


Рис. 2. Азимутальные профили H -компоненты поля на магнитных широтах $65^\circ-66^\circ$ в событии 15.02.2011

Смещение вихря по долготе составляло $\sim 10^\circ$. На рис. 4 показано распределение азимутальных скоростей распространения геомагнитных пульсаций и центров эквивалентных токовых вихрей по MLT



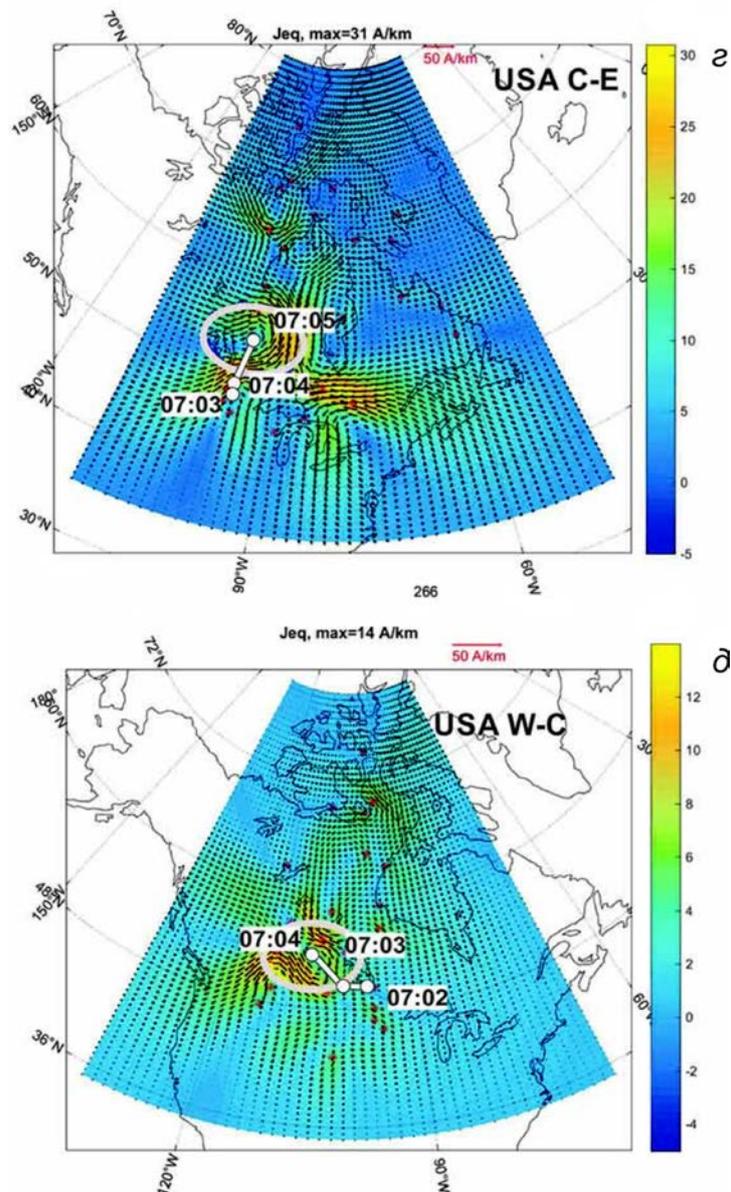


Рис. 3. Распределения эквивалентных ионосферных токов вдоль массивов станций Im (а) и Gr (б), USA E-Gr (в), USA C-E (г), USA W-C (д). Серая сплошная линия — контур вихря в конечный момент времени, белые линии на каждой панели — траектория смещения центра вихря в интервалы времени, обозначенные цифрами

(геомагнитной долготе) в событиях 15.02.2011 (а) и 12.01.2008 (б). На панелях в, г показано распределение геомагнитных широт центров эквивалентных токовых вихрей, а также резонансов силовых линий относительно MLT в событиях 15.02.2011 (в) и 12.01.2008 (г). Распространение пульсаций изучалось вдоль диапазонов широт 57° – 60° , 65° – 66° и 68° – 71° , а распространение вихрей рассматривалось относительно выбранных станций, обеспечивающих двумерное покрытие. Показаны также ошибки измерений, рассчитанные на основе инструментальных погрешностей измерений используемых физических параметров с уровнем достоверности 95 %. Положительные скорости соответствуют распространению на запад, отрицательные — на восток. Видно (панели а, б), что западное распространение как Pc5-пульсаций, так и вихрей преобладало в обоих событиях, в которых можно отметить также возрастание скорости с 5–10 до 20–25 км/с в секторе

04–06 MLT, а затем ее уменьшение до исходной величины, хорошо заметное 15.02.2011. Из анализа следует, что азимутальные скорости перемещения центров вихрей в основном согласуются по величине и направлению со скоростями перемещения геомагнитных пульсаций. Скорости составляют 5–25 км/с, однако для некоторых вихрей превышают 36 км/с. Динамика азимутальной скорости TCV по долготе в [Lühr et al., 1996] (2.5 км/с в 10:45 MLT затем рост до 7.4 км/с в 06:50 MLT), согласуется с полученной нами. Скорости двух вихрей в [Amm et al., 2002] составляли 7 и 3 км/с, в [Чинкин и др., 2020] — 3.9 и 1.3 км/с с западным направлением распространения, что также согласуется с нашими результатами. Сравнимые скорости азимутального распространения 9.5 км/с на высоких широтах были отмечены в [Dmitriev, Suvorova, 2023] при изучении смещения джета в магнитослое (magneto-sheath jet) из полуденного сектора в вечерний. Видно (в, г), что широта

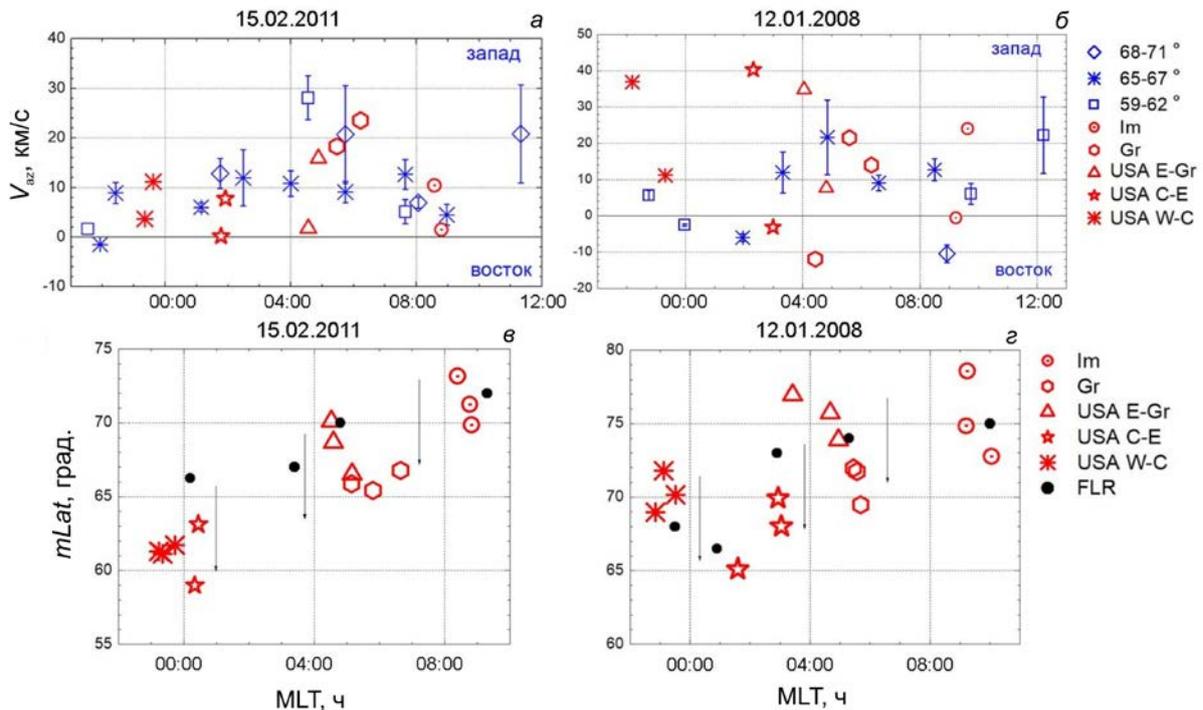


Рис. 4. Распределение азимутальных скоростей распространения геомагнитных пульсаций и центров вихрей эквивалентных ионосферных токов относительно MLT (магнитной долготы) в событии 15.02.2011 (а) и 12.01.2008 (б). Приведены значения для диапазонов широт 68°–71°, 65°–68°, 59°–62°. Положительные скорости соответствуют распространению на запад, отрицательные — на восток. Показано распределение геомагнитной широты вихрей ЭИТ относительно MLT, черные точки — геомагнитные широты, на которых регистрировались резонансные колебания силовых линий (FLR) в этих же событиях 15.02.2011 (в), 12.01.2008 (г)

центров вихрей ЭИТ линейно зависит от MLT — уменьшается на 10°–15° по направлению к ранним часам (отмечено вертикальными стрелками). Подобную зависимость демонстрируют и широты, на которых регистрируется максимальная амплитуда геомагнитных пульсаций (резонансных колебаний силовых линий), они довольно хорошо совпадают с широтами центров вихрей ЭИТ. Широты резонансных колебаний силовых линий оценивались по изменениям амплитуды и фазы вдоль меридиональных профилей магнитных станций, расположенных в областях, где изучалась динамика вихрей ЭИТ (не показано). Условием резонанса считался широтный максимум амплитуды пульсаций, сопровождаемый сдвигом фазы на величину ~180°, как это предложено в [Glassmeier et al., 1999].

На рис. 5 показаны вариации V_x -компоненты скорости ионов на спутниках (Th D, E, A) (а), изменения годографов (B_x -компонента отложена по оси абсцисс, B_y — по оси ординат) магнитного поля на спутнике ThD (б) и на наземной станции Т31 (г) на интервалах времени 6:50–7:10 UT и 7:10–7:30 UT. Спутниковые и наземные данные наблюдений отфильтрованы в диапазоне Pc5. Спутниковые данные приведены в системе координат GSM.

Фазовые задержки колебаний между спутниками ThD, ThE, ThA свидетельствуют о распространении волны на ночную сторону. Фазовые скорости распространения между спутниками рассчитывались как отношение расстояния между спутниками

в XY-плоскости к задержке колебаний между ними и составляют $V_{velD,E}=235.75$, $V_{velE,A}=114.49$ км/с ($V_{velC,D}=449.27$ км/с в событии 12.01.2008). Таким образом, скорости распространения в магнитосфере в 5–10 раз больше максимальной скорости азимутального распространения 25 км/с по наземным наблюдениям, однако не превышают альфвеновских скоростей 620–1006 км/с в магнитосфере.

Подобие годографов колебаний на разных спутниках (б) позволяет оценить фазовые задержки результирующего вектора колебаний B_x - и B_y -компонент магнитного поля, они составляют $V_{MF,D,E}=151$, $V_{MF,E,A}=79.5$ км/с. Фазовые скорости распространения, полученные по скорости ионов, сопоставимы со скоростями распространения по магнитному полю. Величина фазовых скоростей на спутниках близка к скорости течения плазмы (обычно ~100 км/с). В [Zhang et al., 2022] фазовая скорость распространения между спутниками составила ~400 км/с.

Сравнение поляризации векторов магнитного поля на спутнике ThD и на наземной станции Т31 (панели в, г) показывает, что поляризация колебаний в магнитосфере и ионосфере является эллиптической, имеет противоположное направление, а наклоны осей эллипсов поляризации совпадают в обоих геосферах. Противоположное направление вращения типично для альфвеновских колебаний и соответствует повороту фазы на 90°. Для сопоставления скоростей распространения на Земле и в магнитосфере наземные станции, расположенные вдоль магнитных широт 68°–71°, были спроецированы в экваториальную

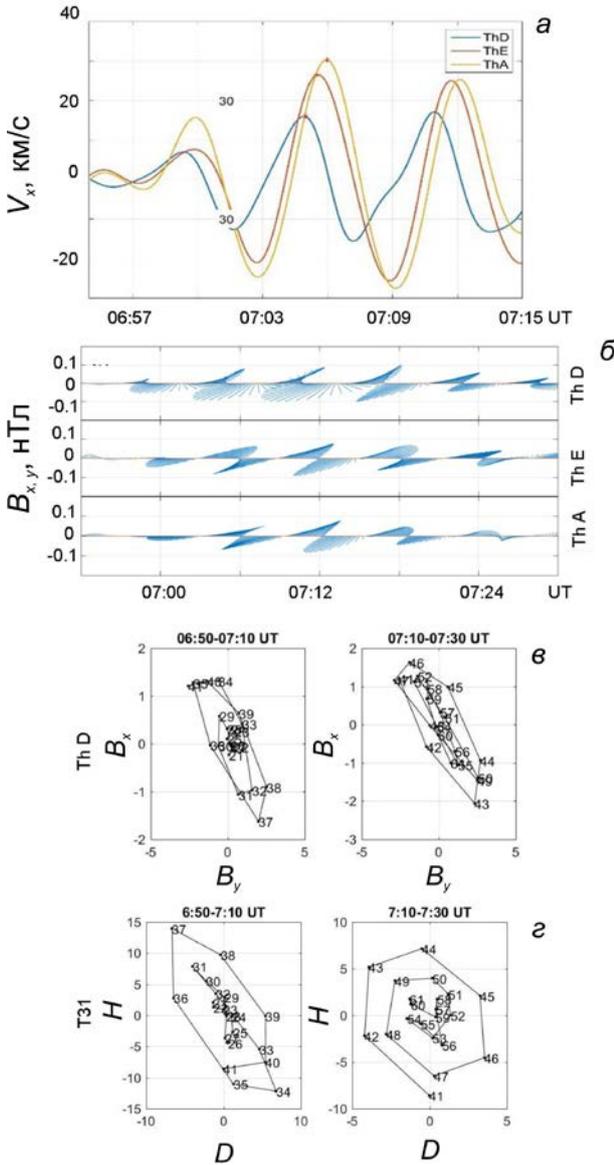


Рис. 5. Вариации V_x -компоненты скорости ионов на спутниках (Th D, E, A) (а), годографы магнитного поля на спутниках (б), поляризация магнитного поля на спутнике ThD (в), поляризация магнитного поля на наземной станции T31 (г). Данные отфильтрованы в диапазоне Pc5

плоскость магнитосферы с помощью модели Цыганенко Ts04 [Tsyganenko, Sitnov, 2005]. Проекция наземных станций и положение спутников в экваториальной плоскости магнитосферы 15.02.2011 в 07:00 UT показаны на рис. 6. Между положениями станций в магнитосфере были оценены расстояния в XY-плоскости, и на основе наземных измерений временных задержек скорости распространения сигналов $V_{SCO_GHB}=68.1$, $V_{GHB_IQA}=21.2$, $V_{IQA_FCC}=19.7$ км/с. Полученные скорости имеют один порядок со скоростями распространения по спутниковым наблюдениям в магнитосфере и соответствуют максимальным скоростям по наземным наблюдениям.

На рис. 7 показаны вариации вектора Умова—Пойнтинга $\mathbf{S}=[\mathbf{E}\mathbf{H}]$ на спутнике ThE в координатах MFA (mean field aligned). Продольная компонента направлена вдоль среднего геомагнитного поля, азимутальная перпендикулярна магнитному меридиану (положительная в восточном направлении), радиаль-

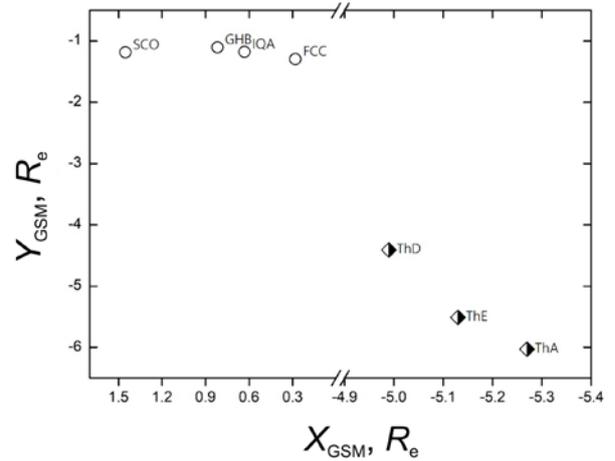


Рис. 6. Проекция наземных станций, расположенных вдоль магнитных широт $68^\circ-71^\circ$ (кружки) и положение спутников (ромбики) в экваториальной плоскости магнитосферы 15.02.2011 в 07:00 UT

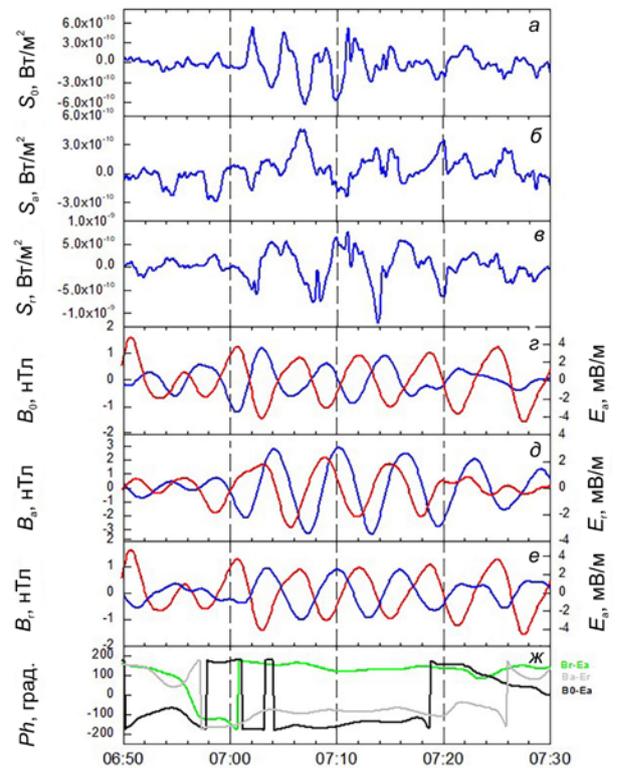


Рис. 7. Вариации вектора Умова—Пойнтинга на спутнике ThE: продольная (а), азимутальная (б), радиальная (в) компоненты, продольная (г), азимутальная (д), радиальная (е) компоненты магнитного поля и азимутальная и радиальная компоненты электрического поля на спутнике ThE и сдвиги фаз между ними. На панелях г, д, е синим цветом показано магнитное, а красным — электрическое поле

ная компонента есть векторное произведение азимутальной компоненты на продольную (положительное направление в сторону более высоких L-оболочек): продольная — S_0 (а), азимутальная — S_a (б), радиальная — S_r (в) компоненты, ниже на панелях (г, д, е) приведены вариации магнитного и электрического полей, соответствующие этим компонентам, и сдвиги фаз между ними (ж). В S_0 -компоненте частота колебаний примерно в 2 раза выше по сравнению с S_r -компонентой. Частота колебаний в S_a -компоненте

в начале интервала примерно в 2 раза выше, чем в его конце, колебания в этой компоненте не такие регулярные как в S_0 -компоненте. Анализ сдвигов фаз показывает, что колебания в S_0 - и S_r -компонентах сдвинуты на угол $\pm 200^\circ$, а в S_a -компоненте — на 90° – 100° , что соответствует стоячей волне при резонансе силовых линий. Разная частота колебаний на этом спутнике также наблюдается в измерениях плазменных детекторов, частота колебаний в концентрации ионов (см. рис. 1, *a*) в два раза выше по сравнению с частотой колебаний в их скорости (см. рис. 1, *b–z*). Таким образом, на этом спутнике одновременно регистрировались волны разных типов.

В работе [Oliveira et al., 2020] рассматривался вопрос: могут ли одновременно наблюдаться колебания на частотах фундаментальной и второй гармоники во время резонанса силовых линий. Авторы показали, что колебания с разными частотами имеют разные источники: колебания с фундаментальной частотой преимущественно возбуждаются при взаимодействии с магнитосферой межпланетных ударных волн (МУВ), не имеющих наклон в XZ-плоскости, колебания на частоте второй гармоники — наклонными МУВ. Таким образом, можно считать, что на спутнике *THE* колебания с кратной частотой не являются разными гармониками, возбуждаемыми при резонансе.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрена азимутальная динамика Pc5-пульсаций и их эквивалентных токовых систем в магнитосфере и ионосфере в протяженном секторе долгот (0–12 MLT). Обнаружено, что сигнатуры вихрей в магнитосфере распространяются в том же направлении, что и в ионосфере, со скоростями, в 5–10 раз большими максимальной скорости азимутального распространения (25 км/с) по наземным наблюдениям. Скорости по наземным и спутниковым наблюдениям согласуются с результатами других работ. Кроме того, проведенное исследование позволило выявить особенности, описанные ниже.

4.1. Динамика геомагнитных Pc5-пульсаций и эквивалентных токовых вихрей

Показанная на рис. 3 токовая система пульсаций, представляющая собой вихри холловского тока, позволяет отнести их к событиям TCV — изолированным импульсным возмущениям в геомагнитном поле, состоящим из двух и большего количества импульсов противоположной полярности и наблюдающимся на дневной стороне в высоких широтах. Как следует из рис. 3, 4, вихри перемещались не только на запад, но и по меридиану, а также на восток. Совпадение скоростей распространения пульсаций и вихрей по величине и направлению, свидетельствует о том, что либо динамика вихрей является первопричиной распространения пульсаций, либо распространение и вихрей, и пульсаций имеет общую причину, например распространение МГД-волны в магнитосфере.

Азимутальное распространение с ночной стороны на дневную можно объяснить следующим образом: в [Клибанова и др., 2016] установлено, что Pc5-пульса-

ции, в основном распространялись с дневной стороны на ночную, но при этом регистрировалось и противоположное распространение. Авторы связали это с возбуждением встречных волн за счет пересоединения на ночной стороне магнитосферы. Рассматриваемые события происходили на спокойном фоне (суббурь не наблюдалось), поэтому можно предположить, что возбуждение встречных волн происходит за счет отражения от внутренней поверхности резонатора, в котором и происходит возбуждение пульсаций. Заметим, что о существовании такого резонатора сообщалось в [Mazur, Leonovich, 2006].

Данное исследование позволяет сравнить фазовые скорости распространения пульсаций и групповые скорости распространения вихрей: анализ рис. 4 *a, б* показывает, что эти скорости близки. Если в событии 15.02.2011 скорости вихрей имели близкие к нулю значения (см. рис. 5, *a*), то в событии 12.01.2008 они в основном превышали скорости пульсаций.

4.2. Магнитосферная проекция вихрей эквивалентных ионосферных токов

В [Zesta et al., 2002] отмечалось, что TCV обладают резонансными характеристиками. В то же время из рис. 4 *в, z* следует, что геомагнитные широты вихрей ЭИТ совпадают с широтами, на которых наблюдались резонансы силовых линий. Таким образом, результаты настоящей работы о совпадении положения вихрей и резонансов силовых линий подтверждаются более ранними исследованиями.

Из рис. 4 *в, z* видно также, что широты вихрей и резонансов силовых линий уменьшались по направлению к более ранним MLT. Смещение вихрей на более низкие широты, видимо, связано с тем, что резонансные колебания происходят на более высоких частотах и соответственно на более коротких силовых линиях. Изменение частот резонансных колебаний, возможно, происходит вследствие значительных пространственных изменений модуля напряженности геомагнитного поля в области, где регистрировались вихри, как это показано в модели IGRF-13 [Alken et al., 2021].

Магнитосферное положение вихрей в обоих рассмотренных событиях соответствует плазменному слою (см. положение спутников в табл. 3) и проецируется на замкнутые силовые линии. Сопоставление широт вихрей на рис. 4 *в, z* с результатами МГД-моделирования в [Maffei et al., 2023] показывает также, что широты вихрей расположены южнее границы замкнутых и разомкнутых силовых линий. Проекция вихрей на замкнутых линиях согласуется с результатами работы [Yahnin, Moretto, 1996], в которой авторы обнаружили, что проекция вихрей, предположительно имеющих источник, расположенный в СВ, оказалась глубоко в магнитосфере. Можно предположить, что вихри в плазменном слое возникают из-за опосредованного воздействия — генерации сдвиговых течений [Kakad et al., 2003], которая в магнитосфере сопровождает явление резонанса.

4.3. Одновременная регистрация быстрой магнитозвуковой и альфвеновской волн

Наблюдение разных по частоте колебаний на одном спутнике, как в событии 15.02.2011 (см. рис. 1, *б*),

описывалось в [Korotova et al., 2020], где авторы интерпретировали их как осцилляции компрессионной моды (продольные колебания), регистрируемые вблизи геомагнитного экватора. При этом колебания с вдвое большим периодом были интерпретированы как поперечные колебания.

В событии 15.02.2011 спутник ThE располагался в экваториальной плоскости и одновременно зарегистрировал быструю магнитозвуковую волну в продольной компоненте вектора Умова—Пойнтинга (см. рис. 7, а) и в концентрации ионов (рис. 1, а), а также альфвеновскую волну в азимутальной, радиальной компонентах (рис. 7, в) и в вариациях скорости (см. рис. 1, б–г), несущую продольный ток. Наблюдаемые нами вихри, вероятно, соответствуют ионосферным основаниям этих продольных токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Сигнатуры вихрей в магнитосфере распространяются в том же направлении, что и в ионосфере, со скоростями, в 5–10 раз большими максимальной скорости азимутального распространения (25 км/с) по наземным наблюдениям. Установлено, что фазовые скорости распространения геомагнитных Pc5-пульсаций совпадают по величине и направлению с групповыми скоростями вихрей в рассмотренных событиях. Показано, что геомагнитные широты вихрей ЭИТ совпадают с широтами, на которых наблюдались резонансы силовых линий. Эти широты уменьшаются по направлению к более ранним MLT.

Принимая во внимание, что азимутальное распространение и пульсаций, и вихрей происходит как с дневной стороны на ночную, так и в противоположном направлении, мы считаем, что наблюдаемая динамика отражает характер распространения МГД-волн в магнитосфере.

Мы благодарим руководителей 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).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клибанова Ю.Ю., Мишин В.В., Цэгмэд Б. и др. Свойства дневных длиннопериодных пульсаций во время начала магнитной бури. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. Т. 56, № 4. С. 457–471.

Макаров Г.А., Соловьев С.И., Енgebретсон М., Юмото К. Азимутальное распространение геомагнитного внезапного импульса в высоких широтах при резком спаде плотности солнечного ветра 15 декабря 1995 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. Т. 42, № 1. С. 42–50.

Мишин В.В., Матюхин Ю.Г. Неустойчивость Кельвина—Гельмгольца на магнитопаузе как возможный источник

волновой энергии в магнитосфере Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986. Т. 26, № 6. С. 952–957.

Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.

Чинкин В.Е., Соловьев А.А., Пилипенко В.А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. Т. 60, № 5. С. 588–599.

Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space*. 2021. Vol. 73, no. 49. DOI: [10.1186/s40623-020-01288-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x).

Allan W., White S.P., Poulter E.M. Impulse-excited hydromagnetic cavity and field-line resonances in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1986. Vol. 34. P. 371–385. DOI: [10.1016/0032-0633\(86\)90144-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(86)90144-3).

Amm O., Engebretson M.J., Hughes T., et al. A traveling convection vortex event study: Instantaneous ionospheric equivalent currents estimation of field-aligned currents and the role of induced currents. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A11. P. 1334. DOI: [10.1029/2002JA009472](https://doi.org/10.1029/2002JA009472).

Chelpanov M.A., Anfinogentov S.A., Kostarev D.V., et al. Review and comparison of MHD wave characteristics at the Sun and in Earth's magnetosphere. *Solar-Terr. Phys.* 2022. Vol. 8, iss. 4. P. 3–27. DOI: [10.12737/stp-84202201](https://doi.org/10.12737/stp-84202201).

Chen L., Hasegawa A. A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, no. 7. P. 1024–1032. DOI: [10.1029/JA079i007p01024](https://doi.org/10.1029/JA079i007p01024).

Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Atmospheric Effects of Magnetosheath. *Jets. Atmosphere*. 2023. Vol. 14, iss. 1. P. 45. DOI: [10.3390/atmos14010045](https://doi.org/10.3390/atmos14010045).

Friis-Christensen E.S., McHenry M.A., C.R. Clauer, Vennerstrøm S. Ionospheric traveling convection vortices observed near the polar cleft-A triggered response to sudden changes in the solar wind. *Geophys. Res. Lett.* 1988. Vol. 15, iss.3. P. 253–256. DOI: [10.1029/GL015i003p00253](https://doi.org/10.1029/GL015i003p00253).

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. Traveling magnetospheric convection twin vortices: Observations and theory. *Ann. Geophys.* 1992. Vol. 10. P. 547.

Glassmeier K.-H., Othmer C., Gramm R., et al. Magnetospheric field-line resonances: A comparative planetology approach. *Earth Environment Sci.* 1999. Vol. 20. P. 61–109.

Kakad A.P., Lakhina G.S., Singh S.V. A shear flow instability in plasma sheet region. *Planet Space Sci.* 2003. Vol. 51. P. 177.

Korotova G.I., Sibeck D.G., Singer H.J., et al. Interplanetary magnetic field control of dayside transient event occurrence and motion in the ionosphere and magnetosphere. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 4197–4202.

Korotova G., Sibeck D., Engebretson M., et al. Multipoint observations of compressional Pc5 pulsations in the dayside magnetosphere and corresponding particle signatures. *Ann. Geophys.* 2020. Vol. 38. P. 1267–1281. DOI: [10.5194/angeo-38-1267-2020](https://doi.org/10.5194/angeo-38-1267-2020).

Lühr H.M., Lockwood P.E., Sandholt T.L., Hansen T. Multi-instrument ground-based observations of a travelling convection vortices event. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 14, no. 2. P. 162–181.

Maffei S., Eggington J.W.B., Livermore P.W., et al. Climatological predictions of the auroral zone locations driven by moderate and severe space weather events. *Scientific Rep.* 2023. Vol. 13. P. 779. DOI: [10.1038/s41598-022-25704-2](https://doi.org/10.1038/s41598-022-25704-2).

Mann I.R., Voronkov I., Dunlop M., et al. Coordinated ground-based and Cluster observations of large amplitude global magnetospheric oscillations during a fast solar wind

speed interval. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 405–426. DOI: [10.5194/angeo-20-405-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-405-2002).

Mazur V.A., Leonovich A.S. ULF hydromagnetic oscillations with the discrete spectrum as eigenmodels of MHD-resonator in the near-Earth part of the plasma sheet. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24, no. 6. P. 1639–1648.

Motoba T., Kikuchi T., Lühr H., et al. Global Pc5 caused by a DP2-type ionospheric current system. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. P. 1032–1047. DOI: [10.1029/2001JA900156](https://doi.org/10.1029/2001JA900156).

Oliveira D.M., Hartinger M.D., Xu Z., et al. Interplanetary shock impact angles control magnetospheric ULF wave activity: Wave amplitude, frequency, and power spectra. *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47. P. 1–11. DOI: [10.1029/2020GL090857](https://doi.org/10.1029/2020GL090857).

Saito T. Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1969. Vol. 10, iss. 3. P. 319–412.

Saito T. Long-period irregular magnetic pulsation Pi3. *Space Sci. Rev.* 1978. Vol. 21. P. 427–467. DOI: [10.1007/BF00173068](https://doi.org/10.1007/BF00173068).

Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1974. Vol. 22. P. 483–491.

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. P. 5–33. DOI: [10.1007/978-3-030-26732-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26732-2_13).

Wright A.N. Dispersion and wave coupling in inhomogeneous MHD waveguides. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 159–167. DOI: [10.1029/93JA02206](https://doi.org/10.1029/93JA02206).

Yahnin A., Moretto T. Travelling convection vortices in the ionosphere map to the central plasma sheet. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 14. P. 1025–1031. DOI: [10.1007/s00585-996-1025-3](https://doi.org/10.1007/s00585-996-1025-3).

Zhang W., Nishimura Y., Wang B., et al. Identifying the structure and propagation of dawnside Pc5 ULF waves using space-ground conjunctions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. Vol. 127, no. 12. P. e2022JA030473. DOI: [10.1029/2022JA030473](https://doi.org/10.1029/2022JA030473).

Zesta E., Hughes W.J., Engebretson M.J. A statistical study of traveling convection vortices using the Magnetometer Array for Cusp and Cleft Studies. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. P. 18.1–18.21. DOI: [10.1029/1999JA000386](https://doi.org/10.1029/1999JA000386).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu/mag> (дата обращения 22 марта 2024 г.).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 22 марта 2024 г.).

URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26732-2_2#Sec18 (дата обращения 22 марта 2024 г.).

URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/findpeaks.html> (дата обращения 22 марта 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

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*. 2024. Т. 10, № 3. С. 104–115. DOI: [10.12737/szf-103202412](https://doi.org/10.12737/szf-103202412).