

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО АЗИМУТУ И МЕРИДИАНУ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ $Pi3$ КОЛЕБАНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ 8 ДЕКАБРЯ 2017 г.

FEATURES OF EXCITATION AND AZIMUTHAL AND MERIDIONAL PROPAGATION OF LONG-PERIOD $Pi3$ OSCILLATIONS OF THE GEOMAGNETIC FIELD ON DECEMBER 8, 2017

А.В. Моисеев

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

С.А. Стародубцев

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

В.В. Мишин

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

A.V. Moiseev

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

S.A. Starodubtsev

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

V.V. Mishin

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

Аннотация. Изучаются $Pi3$ -пульсации с периодом $T=15\pm 30$ мин, которые регистрировались 8 декабря 2017 г. на наземных станциях в полуденном секторе магнитосферы на широтах конвекционных электроструй DP2 токовой системы. Установлено, что $Pi3$ особенно хорошо выражены в предполуденном секторе с амплитудой до 300 нТл и длительностью до 2.5 ч. Амплитуда пульсаций быстро спадала с уменьшением широты от $\Phi'=72^\circ$ до $\Phi'=63^\circ$. Событие регистрировалось в условиях устойчивой магнитосферной конвекции. В B_z -компоненте межпланетного магнитного поля, направленной к югу, в интервале пульсаций регистрировались иррегулярные колебания, в том числе и в диапазоне $Pi3$, соответствующие медленным магнитозвуковым волнам, не сопровождавшимся заметными вариациями динамического давления P_d . По наземным геомагнитным наблюдениям обнаружено азимутальное распространение пульсаций со скоростью 0.6–10.6 км/с на восток и на запад от полуденного меридиана. Анализ динамики пульсаций по меридиану выявил их распространение к экватору со скоростью 0.75–7.87 км/с. В проекции на магнитосферу скорости близки по величине к наблюдаемым скоростям распространения суббуравых инжекций электронов. В магнитосфере в утреннем секторе во время наземных пульсаций регистрировались геомагнитные пульсации с преобладающей компрессионной компонентой.

Сделан вывод, что распространение колебаний геомагнитного поля в данном событии определялось динамикой инжекций частиц под действием крупномасштабного электрического поля магнитосферной конвекции, вызывающего движение плазмы к Земле, вследствие пересоединения в хвосте магнитосферы. Мелкомасштабные колебания в магнитосфере являлись вторичными, возбужденными проникшими из солнечного ветра колебаниями.

Abstract. We study the $Pi3$ pulsations (with a period $T=15\text{--}30$ min) that were recorded on December 8, 2017 at ground stations in the midday sector of the magnetosphere at the latitude range of DP2 current system convective electrojets. We have found that $Pi3$ are especially pronounced in the pre-midday sector with amplitude of up to 300 nT and duration of up to 2.5 hrs. The pulsation amplitude rapidly decreased with decreasing latitude from $\Phi'=72^\circ$ to $\Phi'=63^\circ$. The event was recorded during the steady magnetospheric convection. In the southward B_z component of the interplanetary magnetic field, irregular oscillations were detected in the $Pi3$ frequency range. They correspond to slow magnetosonic waves occurring without noticeable variations in the dynamic pressure P_d . Ground-based geomagnetic observations have shown azimuthal propagation of pulsations with a 0.6–10.6 km/s velocity east and west of the midday meridian. An analysis of the dynamics of pulsations along the meridian has revealed their propagation to the equator at a velocity 0.75–7.87 km/s. In the projection onto the magnetosphere, the velocities are close in magnitude to the observed propagation velocities of substorm injected electrons. In the dawn-side magnetosphere during ground-observed $Pi3$ pulsations, compression mode oscillations were recorded.

We conclude that propagation of geomagnetic field oscillations in this event depends on the dynamics of particle injections under the action of a large-scale electric field of magnetospheric convection, which causes the plasma to move to Earth due to reconnection in the magnetotail. Small-scale oscillations in the magnetosphere were secondary, excited by the solar wind oscillations penetrated into the magnetosphere.

Ключевые слова: P₃-пульсации, устойчивая магнитосферная конвекция, конвекционные электроструи, инъекции частиц, азимутальное и меридиональное распространение, волновые возмущения в межпланетной среде.

Keywords: P₃ pulsations, steady magnetospheric convection, convection electrojets, particle injections, azimuthal and meridional propagation, wave disturbances in the interplanetary medium.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что во время магнитосферной суббури могут генерироваться геомагнитные пульсации в диапазоне от 0.5 до 100 мГц, низкочастотную часть которого составляют геомагнитные пульсации типа P₃ — иррегулярные длиннопериодные ($T=600\pm 900$ с) колебания геомагнитного поля [Saito, Matsushita, 1967]. Наш интерес к этим пульсациям объясняется тем, что это во многом еще непонятное явление, и, кроме того, они имеют наибольшие величины в спектральной плотности мощности колебаний геомагнитного поля во время суббури. Это означает, что именно они являются основными переносчиками энергии между ионосферой и магнитосферой. Поэтому можно предположить, что P₃-пульсации играют наиболее существенную роль в возбуждении высокоширотной ионосферы, вызывая движение ионов, образование неоднородностей плазмы и т. д. Таким образом, исследование свойств этих пульсаций представляет большой интерес при изучении развития суббуревых явлений в геомагнитном поле.

В ряде работ происхождение P₃-пульсаций объясняется процессами, происходящими во внутренней магнитосфере Земли, среди которых важными являются резонансы магнитных силовых линий на фазе роста суббури [Keiling, 2009], различные механизмы, связанные с магнитосферно-ионосферными взаимодействиями [Russell et al., 2013], процессы пересоединения в хвосте магнитосферы [Angelopoulos et al., 2002], а также неустойчивости в горячей компоненте магнитосферной плазмы [Mager et al., 2013] и токи, связанные с дрейфом частиц, инжектированных во время суббурь [Гульельми, Золотухина, 1980; Магер, Климушкин, 2007].

В то же время обнаружена связь P₃-пульсаций с вариациями параметров межпланетной среды [Моисеев и др., 2016; Parkhomov et al., 2018]. В работе [Alimaganbetov, Streltsov, 2018] проведен статистический анализ волновых возмущений в солнечном ветре (СВ) во время суббурь. В ней рассмотрено 75 интенсивных суббурь и обнаружено, что волновые возмущения с частотами 0.6–0.7 мГц часто наблюдаются во время суббурь одновременно и в магнитосфере, и на Земле.

Исследование скоростей и направления распространения волновых возмущений позволяет установить как их внешний (СВ) или внутренний (магнитосфера) источники, так и трансформацию разных мод колебаний в процессе их генерации.

В работах [Wugant et al., 2002; Keiling et al., 2005] подчеркнута роль МГД-волн в процессах переноса энергии между хвостом магнитосферы и авроральной зоной по наблюдениям на границе плазменного слоя на основе измерений на спутниках POLAR,

CLUSTER и FAST. Эти наблюдения показывают, что поток вектора Пойнтинга, переносимый альфвеновской волной, может являться доминирующим источником энергии вдоль силовых линий магнитного поля на авроральных широтах во время суббури.

Эффективность переноса энергии магнитозвуковыми волнами в магнитосферу через ее границу была исследована в работе [Leonovich et al., 2003], в которой показано, что она достигает 40 % и более в области сверхзвукового обтекания, что гораздо эффективнее, чем на дневной стороне, где коэффициент переноса составляет лишь 1–2 % [McKenzie, 1970]. Такой эффективный перенос потока вектора Пойнтинга способен обеспечить энергетику взаимодействия СВ с магнитосферой не только в спокойное время, но и во время умеренных суббурь. Так, Мишин [1996] на примере изолированной суббури на широте Иркутска показал, что наблюдавшиеся перед ней в течение трех часов сильные 8-минутные магнитозвуковые колебания СВ вполне могли обеспечить ее энергетику.

В настоящей работе приводятся результаты изучения генерации и распространения P₃-пульсаций в условиях устойчивой магнитосферной конвекции в событии 8 декабря 2017 г. Это событие зарегистрировано в условиях сравнительно спокойной геомагнитной обстановки, что позволяет более детально изучить направление и скорости распространения геомагнитных пульсаций.

1. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для изучения характеристик геомагнитных пульсаций нами использовались данные геомагнитных наблюдений из известной базы данных SUPERMAG [Gjerloev, 2012] [<http://supermag.jhuapl.edu/mag>], а также проектов MAGDAS [<http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/magdas>] и THEMIS [http://themis.ssl.berkeley.edu/gmag_desc.shtml]. Измерения на спутниках ACE, WIND и THEMIS использовались из базы CDAWEB [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>], а наблюдения на спутниках GOES — из базы NOAA [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html>]. Координаты спутников приведены в табл. 1. Элементы орбит спутников в магнитосфере в системе координат GSM показаны на рис. 1. Для изучения длиннопериодных вариаций магнитного поля и параметров плазмы мы использовали данные наблюдений с 1-минутным усреднением. Координаты наземных станций, данные которых мы используем, приведены в табл. 2. Для выделения пульсаций из данных спутниковых и наземных наблюдений была удалена длиннопериодная часть — бухтообразные возмущения с периодом $T \geq 60$ мин — с помощью цифрового фильтра

Таблица 1

Координаты спутников в межпланетной среде и в магнитосфере

Спутник	Время, UT	Координаты		
		X_{GSM}, R_E	Y_{GSM}, R_E	Z_{GSM}, R_E
ACE	11:00	237.10	-22.08	31.31
WIND	11:00	194.61	-0.31	-8.79
GOES 13	12:00	1.82	-6.08	1.84
GOES 14	12:00	-1.31	-6.46	0.53
GOES 15	12:00	-4.19	-5.03	-0.93
THEMIS E	12:00	-2.77	-8.90	0.11

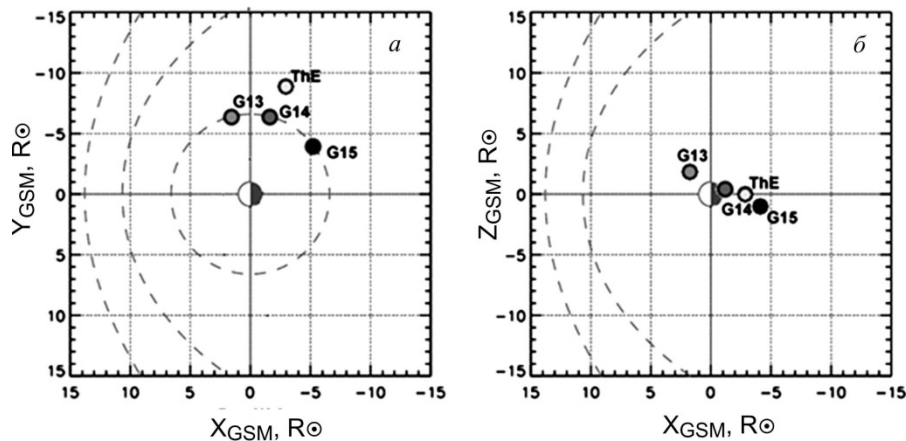


Рис. 1. Расположение различных спутников в плоскостях XY (а) и XZ (б) в системе координат GSM в 12.00 UT

в пакете Matlab (функция `filtfilt.m`, <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/filtfilt.html>), не вносящего фазовые сдвиги в выходной сигнал относительно входного.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1 Вариации параметров межпланетной среды

На рис. 2 представлены данные измерений параметров межпланетной среды на космическом аппарате (КА) ACE со сдвигом около 60 мин, что соответствует времени распространения возмущения от КА до подсолнечной точки магнитопаузы. На панели а в системе координат GSM показаны вариации B_z -компоненты и модуля B межпланетного магнитного поля (ММП) (панель б, правая шкала); на панелях б-г показаны вариации плотности N , скорости V_x , динамического давления СВ P_d . Здесь же приведены вариации E_y -компоненты электрического поля СВ, значения геомагнитных индексов AU , AL (панели д-е) в 05:00–15:00 UT 08.12.2017. Видно, что вариации B_z -компоненты при неизменном южном направлении ММП привели к интенсивным флуктуациям AL -индекса с амплитудой 100–200 нТл и периодом 20–30 мин, при этом максимальное значение AL достигло -370 нТл. Важно отметить, что данное событие регистрировалось в отсутствие магнитной бури, но на фазе спада высокоскоростного потока СВ. Далее мы будем рассматривать возмущения, наблюдавшиеся в интервале времени 10.00–15.00 UT, обозначенном внизу черным прямоугольником.

Сопоставление вариаций высокоширотных индексов геомагнитной активности с вариациями E_y ,

рассчитанными по формуле $E_y = V_x B_{yz} \sin^2(\theta/2)$, где $B_{yz} = (B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$, показывает их общий ход (серые штриховые линии на панелях д, е). Этот факт, а также неизменность южного направления B_z ММП свидетельствуют, что наблюдаемые возмущения можно отнести к так называемым возмущениям устойчивой магнитосферной конвекции (steady magnetospheric convection, SMC) [Pytte et al., 1978; Sergeev et al., 1996].

Как и в событиях, рассмотренных в работах [Моисеев и др., 2016; Parkhomov et al., 2018], в данный период наблюдается антикорреляция плотности СВ и модуля ММП (рис. 2, б). Более явно она видна на вставке в1 по данным КА WIND. В то же время наблюдаемый одновременный рост плотности и скорости СВ привел к небольшому плавному росту его динамического давления в рассматриваемом интервале времени.

2.2 Наблюдения пульсаций на Земле и в магнитосфере

На рис. 3 показаны вариации H - и D -компонент геомагнитного поля в интервале времени 10.00–15.00 UT 08.12.2017 по данным высокоширотных станций на ночной стороне Земли. Станции расположены вдоль высоких $\Phi' = 68^\circ - 72^\circ$ (панели а, б), и более низких $\Phi' = 63^\circ - 66^\circ$ широт (панели в, г), где Φ' — геомагнитная широта. Видно, что иррегулярные пульсации с периодом 15–30 мин были зарегистрированы в интервале 10.50–13.30 UT на авроральных широтах и отчетливо проявились в D -компоненте геомагнитного поля в секторе 20 MLT с максимальной амплитудой

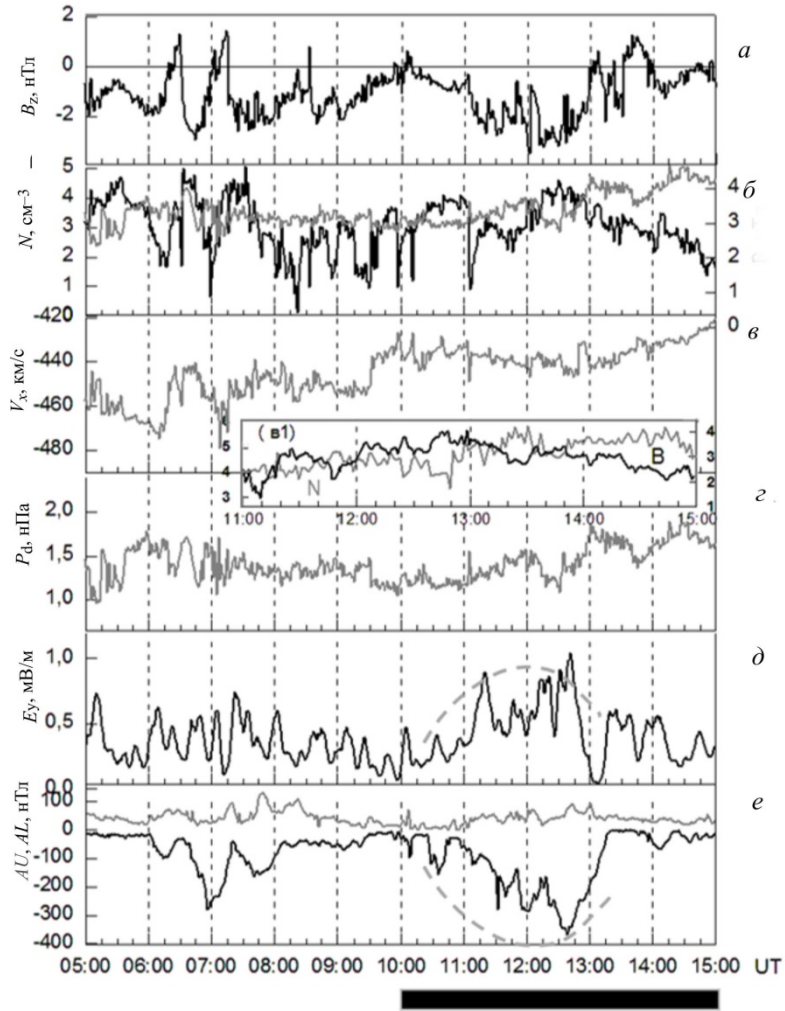


Рис. 2. Зависимость от времени вариаций параметров межпланетной среды по данным КА ACE: B_z -компонента ММП (а), плотность СВ N (серая линия, шкала слева), модуль ММП B (черная линия, шкала справа) (б), V_x -компонента скорости СВ (в), динамическое давление СВ P_d (г), E_y -компонента электрического поля СВ (д) AU и AL -индексы геомагнитной активности (е) в 05–15 UT. Данные КА ACE приведены со сдвигом ~60 мин. Вставка в1: изменения плотности плазмы (серая линия, шкала слева) и модуль B ММП (черная линия, шкала справа) по измерениям WIND

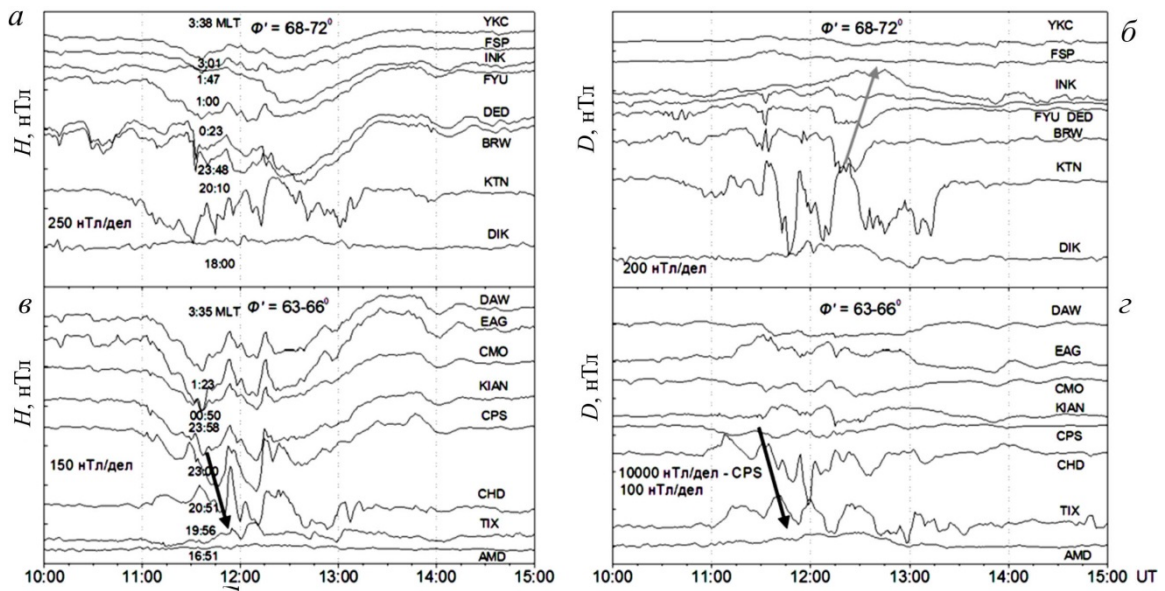


Рис. 3. Вариации H - и D -компонент геомагнитного поля на геомагнитных широтах 68° – 72° (а, б) и 63° – 66° (в, г) как функции времени. Стрелками показано направление распространения пульсаций геомагнитного поля на восток в послеполуночном секторе и на запад — в предполуночном. На панелях а, в указан MLT-сектор станций

Таблица 2

Координаты геофизических (магнитных и риометрических) станций

Станция	Код станции	Географические		Геомагнитные		Полночь MLT, UT
		широта	долгота	широта	долгота	
Yellowknife	YKC	62.48	245.52	69.42	303.15	8:22
Fort Simpson	FSP	61.76	238.77	67.47	295.11	8:59
Inuvik	INK	68.25	226.70	71.50	276.95	10:13
Fort Yukon	FYU	66.57	214.70	67.65	267.17	11:00
Deadhorse	DED	70.36	211.21	70.87	260.73	11:37
Barrow	BRW	71.30	203.25	70.60	253.43	12:12
Kotelnyy	KTN	75.94	137.71	70.98	202.81	15:50
Dixon	DIK	73.55	80.57	69.36	156.64	18:15
Eagle	EAG	64.78	218.80	66.59	272.2	10:37
College	CMO	64.87	212.14	65.45	266.18	11:10
Kenia College	T55	60.55	208.74	60.35	265.78	11:02
Shumagin	SHU	55.38	199.54	53.29	260.26	11:31
Dawson City	DAW	64.05	220.89	66.24	274.66	10:24
Fort Simpson	FSP	61.76	238.77	67.47	295.11	08:59
Fort Smith	FSM	60.02	248.05	67.47	307.71	08:25
Rabbit Lake	RAB	58.22	256.32	67.00	319.92	07:33
Gillam	GIL	56.38	265.36	66.16	333.92	06:33
Rankine Inlet	RAN	62.82	267.89	72.45	336.88	06:28
Fort Churchill	FCC	58.76	265.92	68.50	334.43	06:31
Island Lake	ISL	53.86	265.34	63.70	334.21	06:30
Kiana	KIAN	67.00	199.60	65.62	254.45	12:02
Cape Schmidt	CPS	68.88	180.55	65.37	239.02	13:12
Chokurdakh	CHD	70.62	147.89	65.67	214.11	15:09
Tixie	TIX	71.58	129.00	66.70	198.71	16:04
Amderma	AMD	69.50	61.40	65.85	138.20	19:09
Zhigansk	ZGN	66.75	123.26	62.01	195.44	16:13
Zyryanka	ZYK	65.75	150.78	60.54	218.76	14:51
Yakutsk	YAK	60.02	129.72	54.88	202.6	15:50

до 100 нТл (начало пульсаций отмечено треугольником). На левой панели на станциях BRW и DED в H -компоненте видны пульсации, начавшиеся и закончившиеся раньше, чем в D -компоненте. Следует отметить, что пульсации регистрировались на фоне возмущения DP2-типа, характеризующегося усилением западной электроструи (отрицательной

магнитной бухты в H -компоненте, панель a) в утреннем секторе и восточной (положительной магнитной бухты, панель b) электроструи в вечернем секторе.

Фазовые задержки пульсаций P13 на станциях в разных секторах MLT свидетельствуют об азимутальном распространении пульсаций (схематично показано стрелками) в направлении от полуночи на

восток в послеполуночном и на запад в предполуночном секторе со скоростью 1–6 км/с.

На рис. 4 показаны вариации H - и D -компонент геомагнитного поля вдоль магнитных меридианов 00–01 MLT (послеполуночный сектор, панели *a*, *b*) и 20–21 MLT (предполуночный сектор, панели *в*, *г*) на геомагнитных широтах от 70° до 60° . На нижних панелях (*д*, *е*) показаны вариации Z - и H -компонент геомагнитного поля на нескольких станциях в этих секторах. Как следует из рис. 3 и 4, *a*, *в*, в послеполуночном секторе регистрировалась западная электроструя, а в предполуночном — восточная. Пульсации представляли собой отрицательные вариации в послеполуночном и положительные в предполуночном секторе. Из вариаций Z - (черная сплошная кривая) и H -компонент (серая пунктирная кривая) (рис. 4, *д*) следует, что центр тяжести восточного электроджета находился в предполуночном секторе севернее станции KTN (70.98°), а центр тяжести западного электроджета в послеполуночном секторе находился на широте станции FYU (рис. 4, *е*), что соответствует геомагнитной широте 67.6° . Видно, что на этой станции наблюдались значительные вариации Z -компоненты относительно нуля.

Стрелками на рис. 4, *г* показаны фазовые задержки, свидетельствующие о распространении магнитных пульсаций к экватору. Анализ скоростей распространения проводился по методике, изложенной в работе [Макаров и др., 2002], и применялся к долготным и широтным вариациям (рис. 3, 4), из которых были убраны тренды бухтообразных возмущений. Эти отфильтрованные вариации, обозначенные δH и δD , показаны на рис. 5, *б* соответственно. Направления распространения обозначены стрелками: сплошными — азимутальное (от полуночи на восток и на запад), штриховыми — меридиональное (к экватору). Значения скоростей распространения приведены в табл. 3.

На рис. 7 показаны фазовые задержки при регистрации потоков протонов с энергией 95 кэВ (*a*) и электронов 150 кэВ (*б*) на спутниках GOES 13 (G13), GOES 14 (G14) и GOES 15 (G15), а также фазовые задержки вариаций риометрического поглощения в азимутальном (*в*) и меридиональном направлениях (*г*). Отметим, что в отличие от электронов бухтообразное возмущение практически не проявилось в потоках протонов. Однако, если величина потоков электронов выше на спутнике G15, расположенном ближе к полуночи, то величина потоков протонов выше на G13, расположенном ближе к утреннему сектору. Это можно объяснить дрейфом протонов в западном направлении, а электронов — в восточном.

Профиль риометрического поглощения космического радиошума на станции DAW в 01.36 MLT практически без задержки совпадает с изменением потока электронов на спутнике G15, что свидетельствует о значительном вкладе инжекций электронов в наблюдаемые вариации риометрического поглощения. По относительным задержкам изменений потоков частиц нами определены скорости распространения возмущений, которые составляют 60–80 км/с для потоков электронов по спутниковым наблюдениям на G15, G14, G13 в секторе 04.00–06.00 MLT. Азимутальное распространение потоков электронов совпадает по направлению с распространением

риометрического поглощения (рис. 7, *в*). Мы сопоставили динамику риометрического поглощения с вариациями δD -компоненты геомагнитного поля на этих же станциях, показанных на рис. 8, *в*, *г*. При этом в δD -компоненте отмечается динамика, сходная с риометрическим поглощением как в азимутальном, так и меридиональном направлениях. Значения скоростей, оцененных по риометрическим данным, также приведены в табл. 3. Видно, что в предполуночном секторе регистрируются положительные значения азимутальных скоростей, соответствующие распространению на запад, в послеполуночном — отрицательные, соответствующие распространению на восток. Азимутальная скорость $V_{аз}$ возрастает в пред- и послеполуночных секторах с удалением от полуночного меридиана, в секторах 18–19 MLT на широте 70° скорость составляет $V_{аз}=16.5$ км/с, на широте 66° $V_{аз}=9.4$ км/с. В секторе 02.00 MLT на широте 69.5° скорость увеличивается до $V_{аз}=-6.5$ км/с (знаком « \leftarrow » обозначено распространение на восток). Азимутальная скорость в послеполуночном секторе 2–5 MLT на широтах 66.4 – 67.9 составляет по данным магнитометров $V_{аз}=0.9$ – 3.6 км/с, а по данным риометров в несколько раз ниже $V_{аз}=0.5$ – 0.7 км/с. Скорость меридионального распространения к экватору $V_{мер}$ в секторе 20–21 MLT также возрастает с уменьшением широты с 1.9 км/с на широте 69° до 4–4.8 км/с на широте 63° – 64° . Подобная динамика наблюдается и в послеполуночном секторе 00–01 MLT, где скорость распространения к экватору возрастает от $V_{мер}=1.8$ км/с на широте 69° до $V_{мер}=7.8$ км/с на широте 63° . В утреннем секторе 05.30 MLT значение скорости, направленной на юг, составляло по магнитометрическим данным 0.75 км/с и примерно в 7 раз меньше по данным риометров. Меньшие значения скоростей по данным риометров по сравнению с величиной скоростей по данным магнитометров, возможно, объясняются разными формами возмущений, регистрируемых этими приборами. В риометре возмущения выглядят более сглаженными и поэтому можно определить временные задержки между основными максимумами (минимумами) бухтообразных (медленных) возмущений. В работе [Spanswick et al, 2005] авторы выполнили статистический анализ распространения суббуревых инжекций в азимутальном и меридиональном направлениях по данным риометрических наблюдений. Для анализа ими использовались данные ряда станций из приведенных на рис. 7, 8. Они сопоставляли скорости азимутального распространения по данным магнитометров и риометров и получили близкие величины 2–3 км/с. Что касается меридионального распространения, то ими было зарегистрировано только полусное распространение. Таким образом, в анализируемом нами событии данные риометра позволяют сопоставить с наблюдениями по данным магнитометра лишь направление распространения, а не скорость.

На рис. 9 показаны вариации плотности электронов, сопоставленные с изменениями модуля B и B_z -компоненты геомагнитного поля, измеренных на спутнике ThE (*a*). Ниже показаны вариации потоков электронов (*б*) и протонов (*в*) на этом же спутнике.

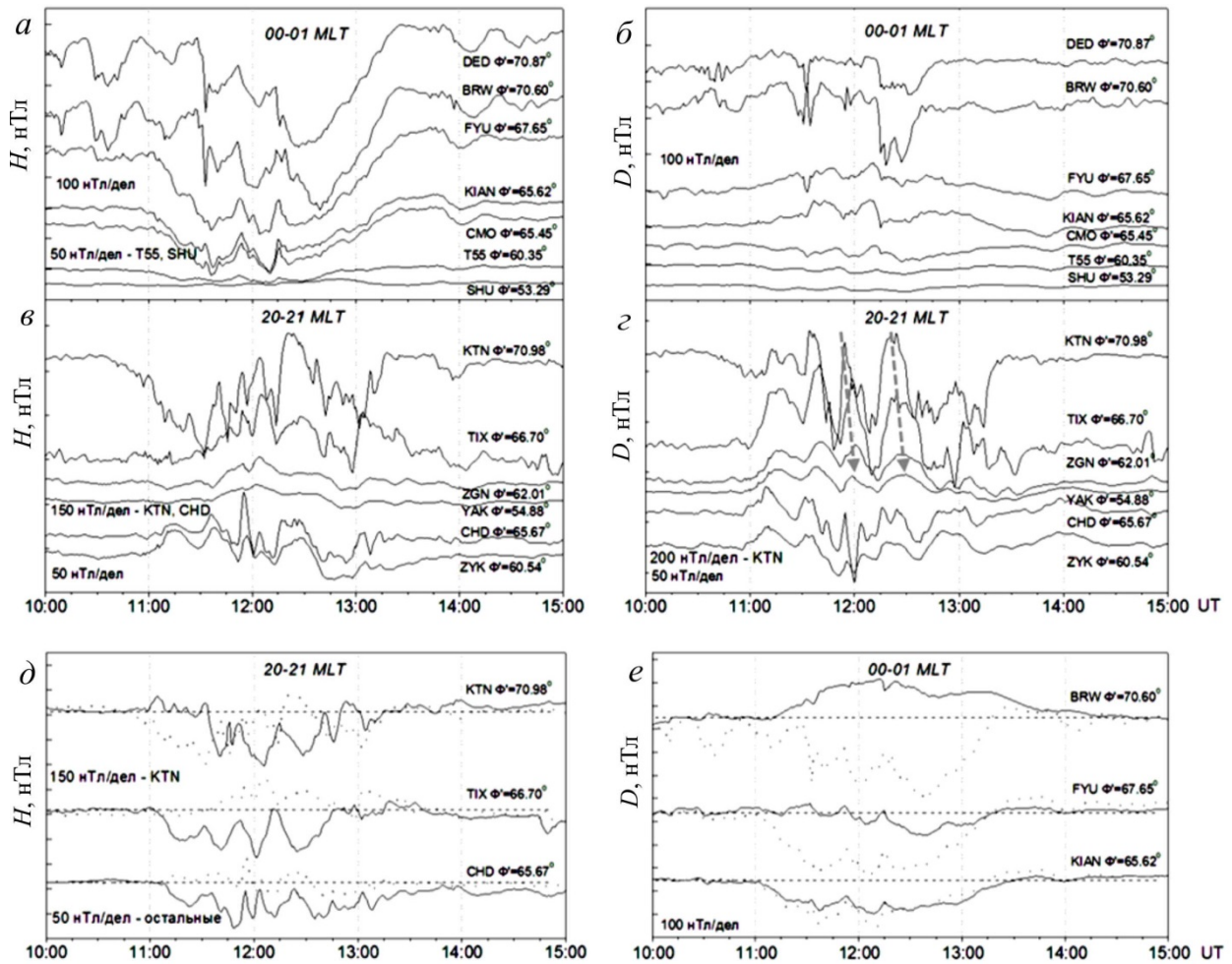


Рис. 4. Зависимость от времени вариаций H - и D -компонент геомагнитного поля вдоль геомагнитных меридианов 00–01 MLT (а, б) и 20–21 MLT (в, з), вариации Z - и H -компонент, показанные черной сплошной и серой пунктирной кривыми соответственно, на некоторых станциях меридиана 20–21 MLT (д) и 00–01 MLT (е)

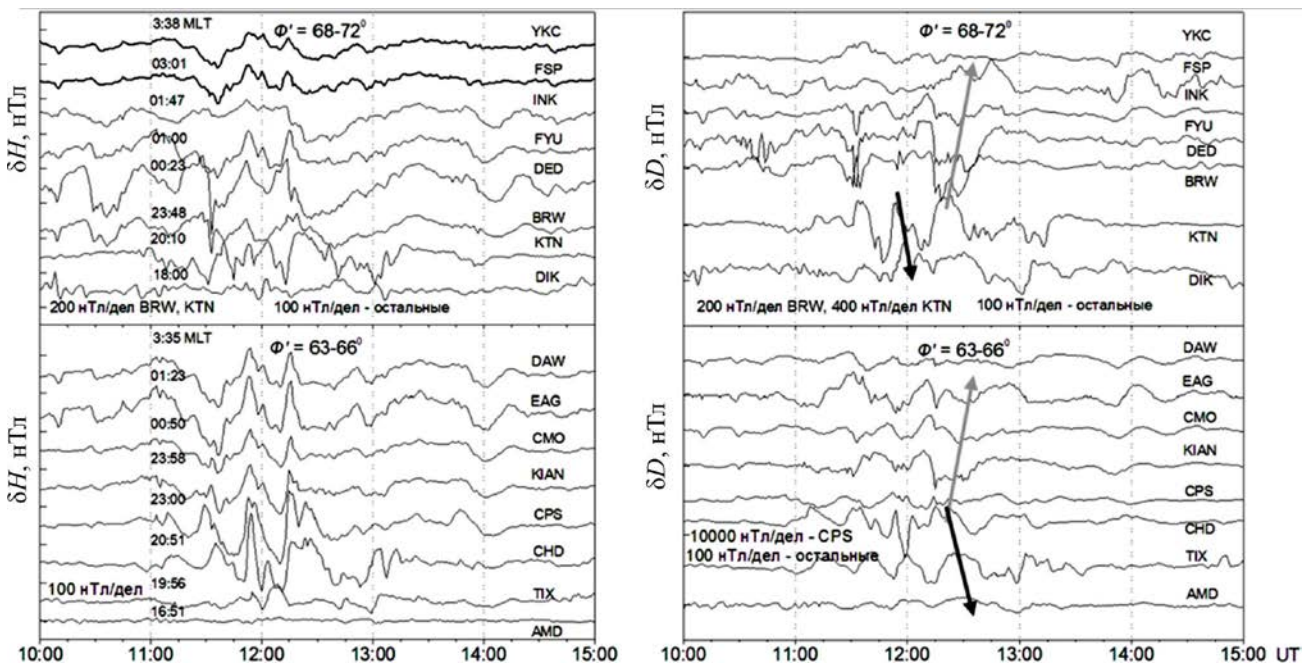


Рис. 5. Вариации δH и δD -компонент геомагнитного поля, отфильтрованные из исходного массива данных, с течением времени по измерениям на тех же станциях, что и на рис. 3. Стрелками показано направление распространения пульсаций поля на восток в послеполуночном секторе и на запад в предполуночном. Период отсечки фильтра $T \geq 60$ мин

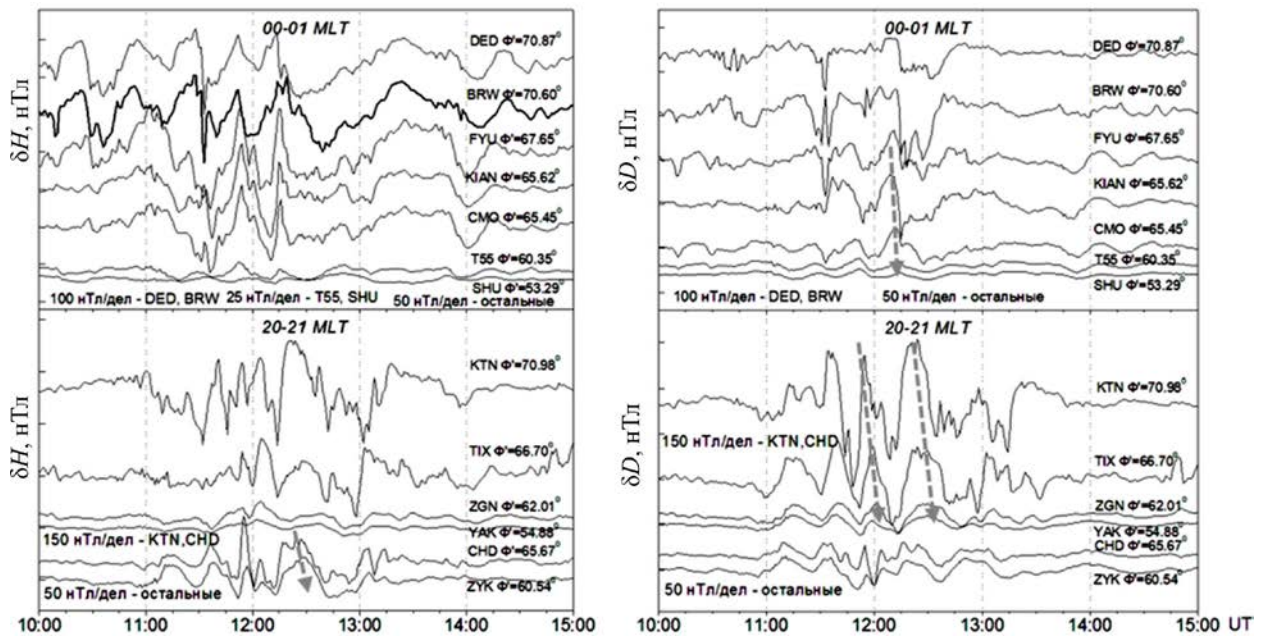


Рис. 6. Вариации δH - и δD -компонент геомагнитного поля, отфильтрованные из исходного массива данных, в зависимости от времени, вдоль геомагнитных меридианов 00–01 MLT (верхняя панель) и 20–21 MLT (нижняя панель). Стрелками показано направление распространения пульсаций к экватору. Период отсечки фильтра $T \geq 60$ мин

Таблица 3

Величина и направление скоростей распространения в ионосфере по данным наземных магнитометров и риометров. Отрицательные значения азимутальных скоростей соответствуют распространению на восток, положительные — на запад. Положительные значения меридиональных скоростей соответствуют распространению к экватору

Приборы	Распространение					
	Азимутальное			Меридиональное		
	Скорости, км/с	Геомагнитная широта, °	MLT, чч:мм	Скорости, км/с	Геомагнитная широта, °	MLT, чч:мм
магнитометры	-6.55	69.49	2:00	0.69	67.71	05:30
	-0.88	69.26	1:30	0.49	66	
	-0.93	70.74	1:00	1.82	69.13	
	-0.62	69.58	0:40	3.13	66.64	00:00–01:00
	16.54	70.17	18:40	1.7	66.55	
	-2.52	66.02	1:10	7.87	62.9	
	-3	65.54	0:20	7.27	56.82	
	10.62	65.52	21:50	1.89	68.84	20:00–21:00
	1.6	66.19	20:20	4.83	64.36	
	9.4	66.28	18:00	3.96	63.11	
	-2.6	66.4	5:00	-	-	
	-3.63	67.4	4:00	-	-	-
	-3.05	67.9	3:17	-	-	-
-0.93	66.85	2:15	-	-	-	
риометры	-0.86	66.4	5:00	-0.1	67.71	05:30
	-0.52	67.4	4:00	-	-	-
	-1.63	67.9	3:17	-	-	-
	-2.4	66.85	2:15	-	-	-

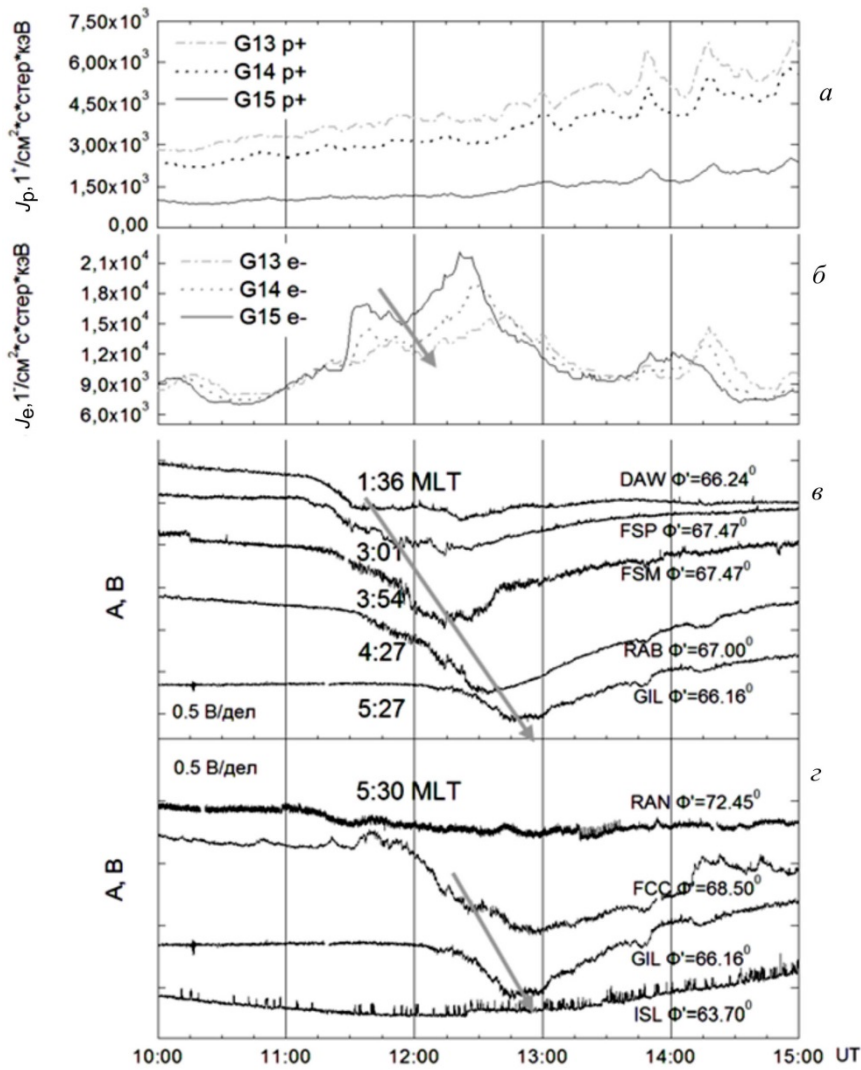


Рис. 7. Изменения со временем потоков протонов с энергией 95 кэВ (а) и потоков электронов с энергией 150 кэВ (б) на спутниках G13, G14, G15; вариации риометрического поглощения по азимуту на станциях, расположенных вдоль геомагнитной широты $66^\circ-67.5^\circ$ (в), а также вдоль меридиана 5:30 MLT (г)

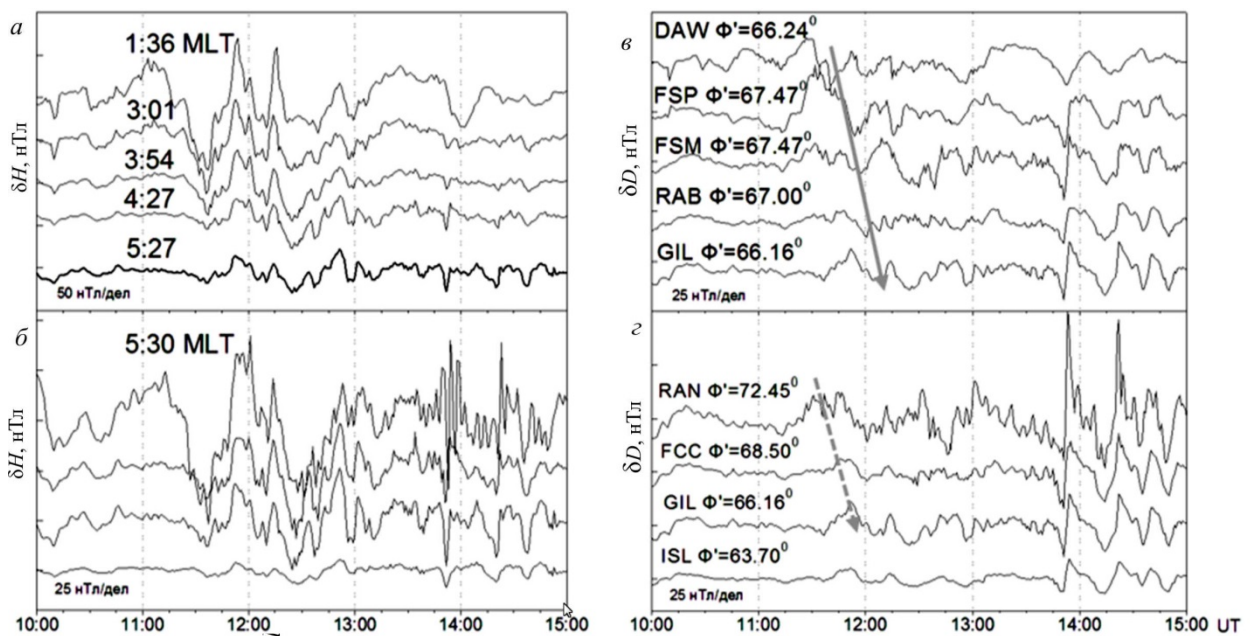


Рис. 8. Вариации δH - (а, б) и δD - (в, г) компонент геомагнитного поля в зависимости от времени на тех же станциях, что на рис. 7

Подобие поведения V и B_z -компоненты свидетельствует о том, что полный вектор изменяется вдоль z -координаты, что соответствует компрессионным вариациям поля, как это показано в работе [Li et al., 2011] по измерениям на спутнике ThE. Отметим также, что вариации плотности n и модуля B регистрировались в противофазе. Такие изменения n и B типичны для медленной магнитозвуковой (ММЗ) волны [Van de Hulst, 1951] либо для колебаний зеркальной моды [Hasegawa, 1969; Woch et al., 1988] и также свидетельствуют о компрессионном характере колебаний в магнитосфере. В работах [Mager et al., 2013; Костарев, Магер, 2017] при интерпретации компрессионных мелкомасштабных колебаний используется дрейфовая компрессионная мода волны, для которой также характерны противоположные изменения плотности n и модуля B . Однако эта мода регистрируется преимущественно на фазе восстановления магнитной бури.

В потоках электронов в рассматриваемый интервал времени наблюдалась бездисперсионная инжекция. Исходя из подобия форм потоков электронов с энергией $E=139$ кэВ на ThE и более низкоэнергичных частиц ($E=95$ кэВ) на G14 (рис. 7), а также из наиболее близких значений z -координаты этих спутников (рис. 1), мы оценили радиальную скорость распространения электронных потоков между этими спутниками (по x -координате расстояние между спутниками составляло 8929.2 км), равную 113 км/с.

Нужно отметить, что в вариациях потоков протонов в интервале 11.15–12.15 UT наблюдалось небольшое усиление, за которым последовал интервал генерации пульсаций с периодом 10–15 мин. Максимальной амплитуды пульсации достигли в потоке протонов с энергией 15.7 кэВ (показано серым цветом на рис. 9, в). Эти пульсации подобно изменениям плотности электронов регистрировались в противофазе с магнитным полем, однако характеризовались более регулярной формой.

На рис. 10, а–в показаны V_x -, V_y -, V_z -компоненты скорости электронов, измеренной на спутнике ThE. На панели г приведены изменения концентрации δn электронов и δB магнитного поля на спутнике ThE. На панели д показаны вариации δB_z ММП на спутнике ACE и δV_x -компоненты скорости на ThE. Из данных на панелях г, д методом фильтрации исключены длиннопериодные бухтообразные возмущения. Видно, что на спутнике ThE, как и на наземных станциях в данном секторе, с ночной стороны наблюдалось радиальное распространение электронов на восток. При этом мы оценили значение горизонтальной компоненты скорости $V_{\text{гор}}=(V_x^2+V_y^2)^{1/2}=127$ км/с в 12 UT. В то же время скорость электронов имела вертикальную компоненту, направленную к экватору $V_z=-357$ км/с, более чем в два раза превышающую горизонтальную составляющую. Направление распространения как по азимуту, так и по меридиану в общем согласуется с наземными данными (рис. 7, 8). Сравнение δn и δB (панель б) показывает их более тесную взаимосвязь (антикорреляцию), чем показанная на рис. 9. Сопоставление изменений V_z -компоненты скорости с вариациями H -компоненты на станции RAN (рис. 8, б) указывает на их подобие.

Из этого можно заключить, что спутник находился вблизи экваториальной проекции силовой линии данной станции и высыпания электронов внесли значимый вклад в наземные вариации H -компоненты геомагнитного поля.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, в изученном событии на ночной стороне Земли наблюдались геомагнитные пульсации Pi3, которые распространялись в азимутальном и меридиональном направлениях и имели максимальную интенсивность на широтах авроральных электроструй DP2 токовой системы. В утреннем секторе магнитосферы на спутнике ThE по данным магнитометров и плазменных детекторов зарегистрированы азимутально-мелкомасштабные колебания, которые не проявились в измерениях магнитного поля на Земле. Проявление пульсаций Pi3 в данных магнитометрических, риометрических и оптических наблюдений рассмотрено также в работе [Белаховский и др., 2015]. Авторы отметили резкое увеличение потоков энергичных частиц по наблюдениям на спутниках, увеличение высыпания электронов по данным риометрического поглощения и усиление интенсивности полярных сияний по данным камер всего неба. При этом магнитные пульсации модулировали потоки электронов и риометрическое поглощение. В изученном нами событии такая модуляция отсутствует и по данным риометров наблюдаются только бухтообразные возмущения. Это можно связать с малой величиной компрессионной компоненты пульсаций в магнитосфере, которая модулирует инкремент электронно-циклотронной неустойчивости [Coronity, Kennell, 1972].

3.1 Распространение пульсаций в ионосфере и внутренней магнитосфере

Согласно [Kiselev, Raspopov, 1976, Saito 1978], подклассом пульсаций Pi3 являются пульсации Ps6. Их особенностью является большая интенсивность в D - и Z -компонентах по сравнению с H -компонентой. Ps6 преимущественно регистрируются в ночные и утренние часы [Saito, 1978; Rostoker, Barichello, 1980] одновременно с полярными сияниями, регистрируемыми во время суббури (авроральными факелами). Однако сияний в рассматриваемом нами событии не наблюдалось. В связи с этим можно считать, что Pi3-пульсации в нашем событии обладают некоторыми особенностями, типичными для Ps6-пульсаций (проявление в D - и Z -компонентах), и, возможно, свидетельствующими о вкладе продольных токов в генерацию этих пульсаций. Пульсации, судя по локализации их амплитуды на широтах, близких к положению конвекционных электроструй, обусловлены их осцилляциями.

Общеизвестно, что волновые возмущения распространяются по азимуту и меридиану, причем направление распространения определяется их источником: как правило, распространение в направлении от Солнца обусловлено внешними источниками, например неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца

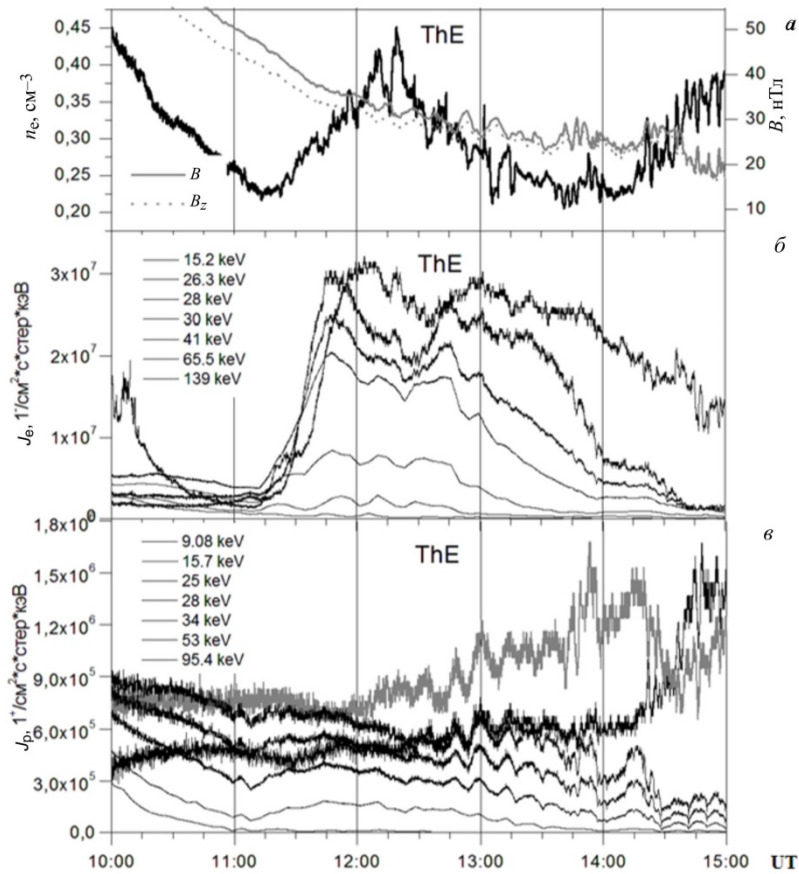


Рис. 9. Вариации плотности электронов n (черная линия, шкала слева), модуля B и B_z -компоненты геомагнитного поля (серая линия, шкала справа) (а); вариации потоков энергичных электронов J_e (б) и ионов J_p (в) в зависимости от времени по измерениям на спутнике ThE

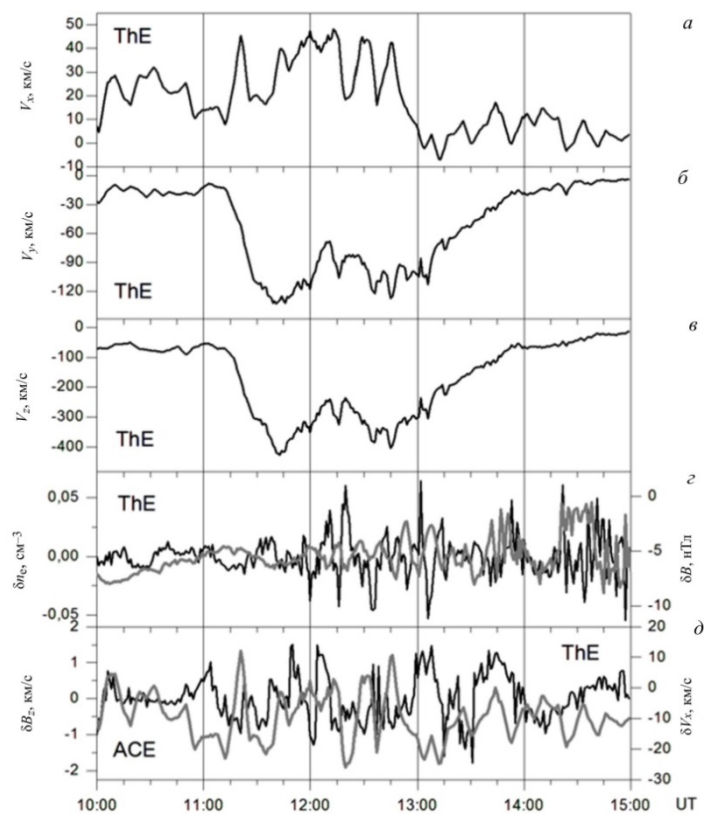


Рис. 10. Значения V_x -, V_y -, V_z -компонент скорости электронов (а-в), концентрации электронов и магнитного поля по измерениям на спутнике ThE (з), B_z -компоненты ММП и V_x -компоненты скорости электронов (д) по данным КА ACE как функция времени

или импульсами динамического давления P_d СВ [Mishin, 1993], а распространение в направлении на Солнце — внутренним источником. Однако, как показано в работах [Клибанова и др., 2014; Моисеев и др., 2016], внешний и внутренний источники могут действовать одновременно и это приводит к противоположному направлению распространения волновых возмущений в разных областях магнитосферы. Практически во всех исследованиях, в которых анализируются волновые возмущения по наземным данным, упоминается факт их меридионального распространения к магнитному полюсу. Основным источником возмущений в этом случае — конверсия быстрой МЗ-волны в альфвеновскую на силовых линиях разной длины и задержка прихода альфвеновской волны при распространении вдоль более длинных силовых линий [Пархомов и др., 2005]. Противоположное распространение волновых возмущений к экватору рассматривается в работах, основанных на анализе данных измерений радаров, указывающих на связь таких волн с возмущениями в F-области ионосферы и их мелкоазиатским источником. Так, в работе [Yeoman et al., 1992] по данным радара SABRE описано распространение к экватору в вечернем секторе. Авторы предположили, что такое распространение обусловлено взаимодействием волна — частица, а именно, горячих протонов кольцевого тока с плазмопаузой. Мы не встречали работ, в которых упоминалось бы об экваториальном распространении волновых возмущений, выявленных на основе данных наземных магнитометров. Отсутствие регистрации таких волн наземным магнитометром может быть связано с обнаруженным в [Yeoman et al., 1992] быстрым затуханием волн, регистрируемых радаром.

Интересно рассмотреть, как меняется величина скорости распространения с широтой. Если предположить, что наблюдаемые фазовые задержки сигнала обусловлены распространением волны, то, согласно теоретическим представлениям, из-за большого различия в величине альфвеновской скорости в точке пересоединения МГД-волны движутся к Земле со скоростью, на порядок больше в долях хвоста, чем в более плотном плазменном слое. Сравнивая скорости, полученные по данным магнитометров на широтах 69° – 70° со скоростями на широтах 65° – 66° , можно заключить, что скорости выше на более низких широтах, т. е. наблюдается обратная картина. С учетом этого мы можем предположить, что в данном событии распространение обусловлено инжекциями плазмы в области конвекционных электроструй, изменяющими величину ионосферной проводимости плазмы и, таким образом, приводящие к наблюдаемой динамике в азимутальном и меридиональном направлениях.

Приведенные в табл. 3 значения скоростей волн на обоих меридианах показывают рост скоростей в два-три раза на широтах ниже 66° . Такую динамику меридиональной скорости можно объяснить более высокими азимутальными скоростями распространения на более низких широтах.

Отметим что горизонтальная компонента скорости электронов $V_{гор}=127$ км/с на спутнике ThE сопоставима со скоростью распространения инжекций (113 км/с) между спутниками ThE и G14, что еще раз подчеркивает значимый вклад электронных инжекций в распространение волновых возмущений. Эта скорость в несколько раз выше скорости суббуревых инжекций 24 км/с, оцененных в работе [Reeves et al., 1996] на основе анализа ряда событий. Это отличие, возможно, связано с разными положениями спутников в их исследовании и в рассматриваемом случае.

Несмотря на то, что в данном событии рассматриваются Pi3-пульсации в условиях устойчивой магнитосферной конвекции, процессы, протекающие в магнитосферно-ионосферной системе, не имеют принципиального отличия от суббуревых возмущений: интенсивность восточной электроструи, как и длительность наблюдения, гораздо меньше западной, бездисперсионные инжекции электронов подобны суббуревым. Кроме того, исходя из необходимости сохранения баланса давлений, считается, что устойчивая конвекция вряд ли возможна в хвосте магнитосферы и постоянное поступление энергии обязательно генерирует повторяющиеся суббури. В работе [Solovyev et al., 1999] рассмотрены подобные возмущения на ночной стороне в событиях, обусловленных устойчивой магнитосферной конвекцией. Эти возмущения сопровождалась генерацией конвекционных электроструй и Ps6-пульсаций с периодом 5–15 мин. Отличительной особенностью этого события являлась генерация N–S-сияний, которые расширились к экватору со скоростью $V \geq 1$ км/с. Спутник, находившийся на ночной стороне, зарегистрировал высокоскоростные потоки по направлению к Земле. Авторы предположили, что сияния в их событии являются оптическим проявлением высокоскоростных потоков плазмы в хвосте магнитосферы.

В работе [Kozlovsky et al., 2001] сопоставлялось экваториальное перемещение дуги сияний с изменением ионосферной конвекции во время суббури. Было обнаружено, что скорость перемещения дуги и скорость конвекции составляют 0.4–0.6 км/с. Авторы связали такую динамику дуги сияний с вариациями B_z -компоненты ММП в результате пересоединения, приводящими к возникновению в ночной магнитосфере электрического поля с направлением утро–вечер, которое обуславливает движение плазмы к Земле, что и проявляется в экваториальном смещении дуги.

В нашем событии скорости экваториального распространения по магнитным и риометрическим наблюдениям одного порядка величины со скоростью перемещения дуги в событии, рассмотренном в [Kozlovsky et al., 2001], но более близки к скорости расширения сияний, полученной в [Solovyev et al., 1999]. Распространение к экватору в нашем событии происходит без существенной задержки в интервале 12–13 UT на разных меридианах: 00–01 MLT, 20–21 MLT, 05.30 MLT (рис. 6–8), что свидетельствует о крупномасштабности источника распространения. Сопоставление распространения к эк-

ватору с динамикой электрического поля СВ E_y (рис. 2) показывает, что E_y возрастала от 0.2 до 1 мВ/м в интервале 10.15–12.45 UT и распространение к экватору наблюдалось начиная с 11.30 UT после достижения E_y значения 0.5 мВ/м. Осцилляции V_x -компоненты скорости на спутнике ThE в нашем событии подобны вариациям скорости на Geotail в событии [Solovuev et al., 1999], однако их амплитуда меньше на порядок величины. Моменты двух минимумов в V_z -компоненте скорости на ThE близки к моментам максимумов электрического поля СВ (11.20 UT и в 12.40 UT, рис. 2, д). Вариации B_z ММП совпадают по времени и близки по периоду к максимальным вариациям V_x -компоненты скорости на рис. 10. Возможно, они модулируют интенсивность DP2 токовой системы за счет вариаций ионосферной проводимости, обусловленных модуляцией скорости движения плазмы к Земле. По-видимому, вариации скорости и вариации магнитного поля (концентрации) на спутнике ThE отражают физические процессы, происходящие в разных областях магнитосферы. Вариации скорости отражают информацию о процессе пересоединения в хвосте магнитосферы. Пульсации в магнитном поле (концентрации) связаны с локальным процессом взаимодействия волна — частица. Пульсации, наблюдаемые на ThE, мелкомасштабны, поскольку не регистрируются на Земле в этом секторе.

Как упоминалось выше, противофазные вариации плотности плазмы и магнитного поля могут соответствовать как ММЗ-волне, так и волне зеркальной моды (ЗМ), поскольку альфвеновские волны не сопровождаются изменениями плотности. Известно, что ММЗ-волны преимущественно наблюдаются в СВ и магнитослое, а волны ЗМ — в магнитосфере [Woch et al., 1990]. Пульсации в утреннем секторе магнитосферы регистрировались при $\beta > 1$, однако значения гидродинамического критерия для ЗМ-волны в нашем событии ($\Gamma > 0$) не соответствуют значениям, необходимым для развития этой неустойчивости: $\Gamma = 1 + \beta_{\text{пер}} [1 - T_{\text{пер}}/T_{\text{пар}}] < 0$ [Hasegawa, 1969], где $\beta_{\text{пер}} = (n_i k T_{i\text{пар}} + n_e k T_{e\text{пер}}) / (B^2 / (2\mu_0))$, $T_{\text{пар}}$, $T_{\text{пер}}$ — температура плазмы параллельно и перпендикулярно магнитному полю, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума. Таким образом, волны, регистрируемые в магнитосфере, с большой степенью вероятности относятся к ММЗ-волнам.

3.2. Проникновение МГД-волн из солнечного ветра в магнитосферу и их трансформация

Сопоставление вариаций B_z ММП на спутнике ACE (рис. 10) с колебаниями скорости на спутнике ThE позволяет предположить, что они проникают из межпланетной среды в магнитосферу.

О проникновении волн в диапазоне Pc5 из межпланетной среды в магнитосферу сообщалось в работах [Kerko et al., 2002; Kerko, Spence, 2003; Kessel et al., 2004]. В работах [Kerko et al., 2002; Kerko, Spence, 2003] при анализе ряда событий геомагнитных пульсаций, вызванных вариациями P_d , было обнаружено, что дискретные частоты внутриагни-

тосферных 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. Керко, Spence [2003] пересчитали наблюдаемые ими частоты колебаний в эквивалентные радиальные размеры соответствующих структур в СВ и получили следующие значения: 150, 200, 300 и 500–600 Мм. Этот результат был подтвержден статистическим анализом данных плотности СВ за 11 лет, выполненным в работе [Viall et al., 2008]. Авторы определили наиболее часто наблюдаемые статистически значимые радиальные размеры структур в СВ: 73, 120, 136 и 180 Мм для медленного СВ и 187, 270 и 400 Мм — для быстрого СВ. Периоды колебаний в нашем событии (20–30 мин) соответствуют радиальным размерам неоднородностей 528–792 Мм и находятся на краю (в хвосте) распределения радиальных размеров возмущений [Viall et al., 2008]. Основная частота колебаний в нашем событии 0.6–0.7 мГц близка к первой гармонике внутриагниотосферных резонансов.

Одновременные изменения плотности n и модуля магнитного поля B плазмы типичны для компрессионных МГД-волн: быстрой (БМЗ) и 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 (рис. 2) и магнитосфере (рис. 7). В обзорной работе [Леонович и др., 2015] утверждается, что только БМЗ-волна с малым азимутальным волновым числом может проникнуть в магнитосферу без существенного спада амплитуды. В магнитосфере она может трансформироваться в альфвеновскую и ММЗ-волны на резонансных магнитных оболочках. Однако вопрос о возможности прямого проникновения ММЗ-волны в магнитосферу остается открытым. В изучаемом событии в отличие от рассмотренного в работе [Моисеев и др., 2016] не отмечалось заметных вариаций P_d , скорость СВ не превышала среднюю величину, что явно недостаточно для развития неустойчивости на границе магнитосферы за счет обтекания ее СВ. Возможно, условия в межпланетной среде, способствующие генерации суббуревой активности за счет пересоединения, благоприятствуют проникновению ММЗ-волны в магнитосферу.

Компрессионный характер волн в магнитосфере (рис. 9), а также их масштаб типичны для неоднородностей, обусловленных источником, характеризующимся малой поперечной длиной волны, например инъекциями частиц. Такие колебания не могут регистрироваться наземными магнитометрами.

Таким образом, в данном событии происходило одновременное возбуждение двух типов колебаний: ММЗ, наблюдаемых в СВ и в магнитосфере, а также регистрируемых на Земле осцилляций авроральных электроструй (в ионосфере) — холловских токов, возбуждаемых альфвеновскими колебаниями продольных токов. В работе [Yeoman, Wright, 2000] на основе данных CUTLASS HF-радар в одном событии были идентифицированы три разные волны. Первая, крупномасштабная, обусловлена внешним

источником, в то время как вторая и третья, мелко-масштабные, обусловлены внутренними источниками. В работе [Beharrell et al., 2010] на основе данных сканирующего риометра были изучены мелко-масштабные колебания с азимутальными волновыми числами, достигавшими 380. Авторы предположили, что наблюдаемые мелко-масштабные колебания являются вторичными, возбуждаемыми первичными колебаниями полости магнитосферы, которые, в свою очередь, были вызваны импульсами P_d . Компрессионные возмущения магнитосферной полости трансформируются в тороидальные колебания альфвеновской моды, последние отдают свою энергию резонансным протонам посредством механизма затухания Ландау. После затухания первичных колебаний протоны через обратное затухание Ландау отдают энергию вторичным мелко-масштабным колебаниям. Возможно, механизм генерации вторичных колебаний в рассматриваемом событии подобен механизму, предложенному Beharrell et al. [2010], тем более, что скорость ММЗ-волны близка по величине к тепловой скорости ионов плазмы, и поэтому волна может передавать им свою энергию. Значение энергии резонансных протонов, определенное по данным спутника ThE, в нашем событии составляет 15.7 кэВ и соответствует максимальному пику распределения резонансных протонов в работе [Beharrell et al., 2010].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

- По наземным геомагнитным наблюдениям обнаружено азимутальное распространение P₃-пульсаций на восток в послеполуночном и на запад в предполуночном секторе со скоростью 0.6–10.6 км/с. Анализ меридионального распространения позволил выявить факт распространения к экватору со скоростью 0.75–7.87 км/с, причем как азимутальная, так и меридиональная скорости возрастали с уменьшением широты. Такая динамика азимутальной и меридиональной составляющих распространения указывает на преобладающее распространение плазмы в магнитосфере к экватору от полуночного меридиана.

- В магнитосфере Земли в утреннем секторе в интервале периодов наземных пульсаций регистрировались осцилляции магнитного поля компрессионной моды.

- Предполагается, что колебания в данном событии являлись результатом проникновения волн из СВ вследствие пересоединения и трансформации в магнитосфере Земли за счет взаимодействия волна — частица.

Авторы выражают благодарность Климушкину Д.Ю. и Леоновичу А.С. за обсуждение данной статьи. Авторы благодарны за возможность использования данных руководителям следующих проектов: CANMOS, Geomagnetism Unit of the Geological Survey of Canada; GIMA; Intermagnet; USGS, Jeffrey J. Love; and 210 MM (MAGDAS) data, and data set of the satellite observations from CDAWEB (D.J. McComas, R. Lepping, K. Ogilvi, G. Paschmann,

and G. Reeves). Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 18-45-140037 (МАВ), № 18-42-140002 (ССА) и № 18-05-00437 (МВВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н. P₃-пульсации и их связь с потоками заряженных частиц в магнитосфере и ионосфере // Proc. XXXVIII Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena». Apatity. 2015. P. 71–74.
- Гульельми А.В., Золотухина Н.А. Возбуждение альфвеновских колебаний магнитосферы асимметричным кольцевым током // Иссл. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1980. Вып. 50. С. 129–138.
- Клибанова Ю.Ю., Мишин В.В., Цэгмэд Б. Особенности дневных длиннопериодных пульсаций, наблюдаемых во время импульса солнечного ветра на фоне суббури 1 августа 1998 г. // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 6. С. 459–467.
- Костарев Д.В., Магер П.Н. Дрейфово-компрессионные волны, распространяющиеся в направлении дрейфа энергичных электронов в магнитосфере // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 20–29. DOI: [10.12737/szf-33201703](https://doi.org/10.12737/szf-33201703).
- Леонович А.С., Мазур В.А., Козлов Д.А. МГД-волны в геомагнитном хвосте: обзор // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, вып. 1. С. 4–22.
- Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Генерация альфвеновских волн движущейся неоднородностью плазмы в магнитосфере // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 5. С. 435–442.
- Макаров Г.А., Соловьев С.И., Енгебретсон 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. О потоке волновой энергии в магнитосферу под действием пульсаций давления солнечного ветра // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1996. Вып. 104. С. 182–185.
- Моисеев А.В., Баишев Д.Г., Муллаяров В.А. и др. Развитие компрессионных длиннопериодных пульсаций на восстановительной фазе магнитной бури 23 мая 2007 г. // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 1. С. 34–43.
- Пархомов В.А., Мишин В.В., Леонович А.С. и др. Магнитосферный отклик в длиннопериодных геомагнитных пульсациях, Наблюдаемый во время множественных пересечений магнитопаузы спутником «ИНТЕРБОЛ-1» // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 8. С. 161–163.
- Alimaganbetov M., Streltsov A.V. ULF waves observed during substorms in the solar wind and on the ground // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 181. P. 10–18.
- Angelopoulos V., Chapman J.A., Mozer F.S., et al. Plasma sheet electromagnetic power generation and its dissipation along auroral field lines // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. 1181. DOI: [10.1029/2001JA900136](https://doi.org/10.1029/2001JA900136).
- Baumjohann W., Treumann R.A. Basic Space Plasma Physics. London: Imperial College Press, 1996. 340 p. DOI: [10.1142/p015](https://doi.org/10.1142/p015).
- Beharrell M., Kavanagh A.J., Honary F. On the origin of high-m magnetospheric waves // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2010. V. 115, A2. DOI: [10.1029/2009JA014709](https://doi.org/10.1029/2009JA014709).
- Coroniti F.V., Kennell C.F. Changes of magnetospheric configuration during the substorm growth phase // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 3361–3370.
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).
- Hasegawa A. Drift mirror instability in the magnetosphere // Physics of Fluids. 1969. V. 12. P. 2642–2650.

Keiling A. Alfvén waves and their roles in the dynamics of the Earth's magnetotail: A review // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 142. P. 73–156.

Keiling A., Parks G.K., Wygant J.R., et al. Some properties of Alfvén waves: Observations in the tail lobes and the plasma sheet boundary layer // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, A10S11. DOI: 10.1029/2004JA010907.

Kepko L., Spence H.E., Singer H.J. ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1197. DOI: 10.1029/2001GL014405.

Kepko L., Spence H.E. Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1257. DOI: 10.1029/2002JA009676.

Kessel R.L., Mann I.R., Fung S.F., et al. Correlation of Pc5 wave power inside and outside the magnetosphere during high speed streams // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 629–641.

Kiselev B.V., Raspopov O.M. Excitation of Pi3 pulsations during substorms // *Proc. IAGA Meeting of Unmanned Observatories in Antarctica*. Tokyo, 1976. P. 88.

Kozlovsky A., Lakkala T., Kangas J., Aikio A. Response of the quiet auroral arc motion to ionospheric convection variations // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 21463–21474.

Leonovich A.S., Mishin V.V., Cao J.B. Penetration of magnetosonic waves into the magnetosphere: influence of a transition layer // *Annales Geophysicae*. 2003. V. 21. P. 1083–1093.

Li W., Thorne R.M., Bortnik J., et al. Modulation of whistler mode chorus waves: 1. Role of compressional Pc4–5 pulsations // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A06205. DOI: 10.1029/2010JA016312.

Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Kostarev D.V. Drift-compressional modes generated by inverted plasma distributions in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 4915–4923. DOI: 10.1002/jgra.50471.

McKenzie J.F. Hydromagnetic wave interaction with the magnetopause and the bow shock // *Planetary and Space Sci.* 1970. V. 18. P. 1–23.

Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin–Helmholtz instability // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98, N A12. P. 21365–21372.

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eiselevich V.G., et al. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm-like disturbances // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 181. P. 55–67.

Pytte T., McPherron R.L., Hones E.W.Jr., West H.I.Jr. Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms. III. Distinction between polar substorms and convection-driven negative bays // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83, N. A2. P. 663–679.

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.

Rostoker G., Barichello J.C. Seasonal and diurnal variation of Ps6 magnetic disturbances // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 161.

Russell A.J.B., Wright A.N., Streltsov A.V. Production of small-scale Alfvén waves by ionospheric depletion, nonlinear magnetosphere-ionosphere coupling and phase mixing // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 1450–1460. DOI: 10.1002/jgra.50168.

Saito T. Long-period irregular magnetic pulsations Pi3 // *Space Sci. Rev.* 1978. P. 427.

Saito T., Matsushita S. Geomagnetic pulsations associated with sudden commencements and sudden impulses // *Planetary Space Sci.* 1967. V. 15. P. 573–587.

Sergeev V.A., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I. Steady magnetospheric convection: A review of recent results // *Space Sci. Rev.* 1996. V. 75. P. 551.

Solov'yev S.I., Baishev D.G., Barkova E.S., et al. Structure of disturbances in the dayside and nightside ionosphere during periods of negative interplanetary magnetic field B_z // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1999. V. 104. P. 28019–28039. DOI: 10.1029/1999JA900286.

Spanswick E., Donovan E., Liu W., et al. Substorm Associated Spikes in High Energy Particle Precipitation The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling. Geophysical Monograph Ser. AGU, 2005. DOI: 10.1029/155GM24.

Van de Hulst H.C. Problems of Cosmical Aerodynamics. Dayton, OH: Central Air Documents Office, 1951. P. 45.

Viall N.M., Kepko L., Spence H.E. Inherent length-scales of periodic solar wind number density structures // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N A07101. DOI: 10.1029/2007JA012881.

Woch J., Kremser G., Pokhotelov O.A., et al. Curvature-driven drift mirror instability in the magnetosphere // *Planetary Space Sci.* 1988. V. 36. P. 383–393.

Woch J., Kremser G., Korth A. A comprehensive investigation of compressional ULF waves observed in the ring current // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 15113–15132. DOI: 10.1029/JA095iA09p15113.

Wygant J.R., Keiling A., Cattell C.A., et al. Evidence for kinetic Alfvén waves and parallel electron energization at $(4–6)R_E$ altitudes in the plasma sheet boundary layer // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1201. DOI: 10.1029/2001JA900113.

Yeoman T., Tian M., Lester M., Jones T.B. A study of Pc5 hydromagnetic waves with equatorward phase propagation // *Planetary and Space Sci.* 1992. V. 40, N 6. P. 797–810.

Yeoman T.K., Wright D.M. ULF waves with drift resonance and drift-bounce resonance energy sources as observed in artificially-induced HF radar backscatter // *Ann. Geophys.* 2000. V. 19. P. 159–170.

URL: <http://supermag.jhuapl.edu/mag> (дата обращения 12 марта 2020 г.).

URL: <http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/magdas> (дата обращения 12 марта 2020 г.).

URL: http://themis.ssl.berkeley.edu/gmag_desc.shtml (дата обращения 12 марта 2020 г.).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 12 марта 2020 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html> (дата обращения 12 марта 2020 г.).

URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/filtfilt.html> (дата обращения 12 марта 2020 г.).

REFERENCES

Alimaganbetov M., Streltsov A.V. ULF waves observed during substorms in the solar wind and on the ground. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 181, pp. 10–18.

Angelopoulos V., Chapman J.A., Mozer F.S., Scudder J.D., Russell C.T., Tsuruda K., et al. Plasma sheet electromagnetic power generation and its dissipation along auroral field lines. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, p. 1181. DOI: 10.1029/2001JA900136.

Baumjohann W., Treumann R.A. Basic Space Plasma Physics. London: Imperial College Press, 1996. 340 p. DOI: 10.1142/p015.

Beharrell M., Kavanagh A.J., Honary F. On the origin of high-m magnetospheric waves. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2010, vol. 115. DOI: 10.1029/2009JA014709.

Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Samsonov S.N. Pi3 pulsations and their correlation with fluxes of charged particles in the magnetosphere and ionosphere. *Proc. XXXVIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity. 2015, pp. 71–74. (In Russian).

Coroniti F.V., Kennel C.F. Changes of magnetospheric configuration during the substorm growth phase. *J. Geophys. Res.* 1972, vol. 77, pp. 3361–3370.

- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A09213, DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).
- Guglielmi A.V., Zolotukhina N.A. Excitation of Alfvén oscillations in the magnetosphere by asymmetric ring current. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1980, iss. 50, pp. 129–138. (In Russian).
- Hasegawa A. Drift mirror instability in the magnetosphere. *Phys. Fluids.* 1969, vol. 12, pp. 2642–2650.
- Keiling A. Alfvén waves and their roles in the dynamics of the Earth's magnetotail: A review. *Space Sci. Rev.* 2009, vol. 142, pp. 73–156.
- Keiling A., Parks G.K., Wygant J.R., Dombek J., Mozer F.S., Russell C.T., Streltsov A.V., Lotko W. Some properties of Alven waves: Observations in the tail lobes and the plasma sheet boundary layer. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A10S11. DOI: [10.1029/2004JA010907](https://doi.org/10.1029/2004JA010907).
- Kepko L., Spence H.E., Singer H.J. ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, p. 1197. DOI: [10.1029/2001GL014405](https://doi.org/10.1029/2001GL014405).
- Kepko L., Spence H.E. Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, p. 1257. DOI: [10.1029/2002JA009676](https://doi.org/10.1029/2002JA009676).
- Kessel R.L., Mann I.R., Fung S.F., Milling D.K., O'Connell N. Correlation of Pc5 wave power inside and outside the magnetosphere during high speed streams. *Ann. Geophys.* 2004, vol. 22, pp. 629–641.
- Kiselev B.V., Raspopov O.M., Excitation of Pi3 pulsations during substorms. *Proc. IAGA Meeting of Unmanned Observatories in Antarctica*. Tokyo. 1976, p. 88.
- Klibanova Yu.Yu. Mishin V.V., Tsegmed B. Peculiarities in daytime observed during solar wind pulse against the background of the August 1, 1998 substorm. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2014, vol. 52, no. 6, pp. 459–467. (In Russian).
- Kostarev D.V., Mager P.N. Drift-compression waves propagating in the direction of energetic electron drift in the magnetosphere. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017, vol. 3, no. 3, pp. 18–27. DOI: [10.12737/stp-33201703](https://doi.org/10.12737/stp-33201703).
- Kozlovsky A., Lakkala T., Kangas J., Aikio A. Response of the quiet auroral arc motion to ionospheric convection variations. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 21463–21474.
- Leonovich A.S., Mishin V.V., Cao J.B. Penetration of magnetosonic waves into the magnetosphere: influence of a transition layer. *Annales Geophysicae*. 2003, vol. 21, pp. 1083–1093.
- Leonovich A.S., Mazur V.A., Kozlov D.A. MHD waves in the geomagnetic tail: A review. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 1, iss. 1, pp. 4–22. (In Russian).
- Li W., Thorne R.M., Bortnik J., Nishimura Y., Angelopoulos V. Modulation of whistler mode chorus waves: 1. Role of compressional Pc4-5 pulsations. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A06205. DOI: [10.1029/2010JA016312](https://doi.org/10.1029/2010JA016312).
- Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Generation of Alfvén waves by a moving plasma inhomogeneity in the magnetosphere. *Fizika plazmy* [Plasma Physics Rep.]. 2007, vol. 33, no. 5, pp. 435–442.
- Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Kostarev D.V. Drift-compressional modes generated by inverted plasma distributions in the magnetosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2013, vol. 118, pp. 4915–4923. DOI: [10.1002/jgra.50471](https://doi.org/10.1002/jgra.50471).
- Makarov G.A., Solovyev S.I., Engebretson M., Yumoto K. Azimuth propagation of geomagnetic sudden pulse in high latitudes at the December 15, 1995 sharp decrease in a solar wind density. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2002, vol. 42, no. 1, pp. 42–50. (In Russian).
- McKenzie J. F.: Hydromagnetic wave interaction with the magnetopause and the bow shock. *Planetary and Space Sci.* 1970, vol. 18, pp. 1–23.
- Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin-Helmholtz instability. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, no. A12, pp. 21365–21372.
- Mishin V.V. On wave energy flux into the magnetosphere under the action of solar wind pressure pulsations. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1996, iss. 104, pp. 182–185. (In Russian).
- Moiseev A.V., Baishev D.G., Mullayarov V.A., Samsonov S.N., Iozumi T., Ioshikawa A., et al. Development of compression long-period pulsations at the recovery phase of the May 23, 2007 magnetic storm. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2016, vol. 54, no. 1, pp. 34–43. (In Russian).
- Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Dmitriev A.V., Chililik V.E. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm-like disturbances. *J. Atmos. Sol. Ter. Phys.* 2018, vol. 181, pp. 55–67.
- Parkhomov V.A., Mishin V.V., Leonovich A.S., Nikolaeva N.C., Solovyev S.I. Magnetospheric response in long-period geomagnetic pulsations observed during multiple crossing of the magnetopause by INTERBALL-1 satellite. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2005, iss. 8, pp. 161–163. (In Russian).
- Pytte T., McPherron R.L., Hones E.W.Jr., West H.I.Jr. Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms. III. Distinction between polar substorms and convection-driven negative bays. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, no. A2, pp. 663–679.
- Reeves G.D., Henderson M.G., McLachlan P.S., Balian R.D., Friedel R.H.W., Korth A. Radial propagation of substorm injections. *Proc. the Third International Conference on Substorms*. Eur. Space Agency Spec. Publ., 1996, ESA SP-389, pp. 579.
- Rostoker G., Barichello J.C. Seasonal and diurnal variation of Ps6 magnetic disturbances. *J. Geophys. Res.* 1980, vol. 85, p. 161.
- Russell A.J.B., Wright A.N., Streltsov A.V. Production of small-scale Alfvén waves by ionospheric depletion, nonlinear magnetosphere-ionosphere coupling and phase mixing. *J. Geophys. Res.* 2013, vol. 118, pp. 1450–1460. DOI: [10.1002/jgra.50168](https://doi.org/10.1002/jgra.50168).
- Saito T. Long-period irregular magnetic pulsations, Pi3. *Space Sci. Rev.* 1978, p. 427.
- Saito T., Matsushita S. Geomagnetic pulsations associated with sudden commencements and sudden impulses. *Planet. Space Sci.* 1967, vol. 15, pp. 573–587.
- Sergeev V.A., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I. Steady magnetospheric convection: A review of recent results. *Space Sci. Rev.* 1996, vol. 75, p. 551.
- Solovyev S.I., Baishev D.G., Barkova E.S., Engebretson M.J., Posch J.L., Hughes W.J., Yumoto K., Pilipenko V.A. Structure of disturbances in the dayside and nightside ionosphere during periods of negative interplanetary magnetic field B_z . *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1999, V. 104, P. 28019–28039. DOI: [10.1029/1999JA900286](https://doi.org/10.1029/1999JA900286).
- Spanswick E., Donovan E., Liu W., Wallis D., Aasnes A., Hiebert T., Jackel B., Henderson M., Frey H. *Substorm Associated Spikes in High Energy Particle Precipitation The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*. Geophysical Monograph Series, AGU, 2005, DOI: [10.1029/155GM24](https://doi.org/10.1029/155GM24).
- Van de Hulst H.C. Problems of Cosmical Aerodynamics. Dayton, OH: Central Air Documents Office, 1951. p. 45.
- Viall N.M., Kepko L., Spence H.E. Inherent length-scales of periodic solar wind number density structures. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, no. A07101. DOI: [10.1029/2007JA012881](https://doi.org/10.1029/2007JA012881).
- Woch J., Kremser G., Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Amata E. Curvature-driven drift mirror instability in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1988, vol. 36, pp. 383–393.
- Woch J., Kremser G., Korth A. A comprehensive investigation of compressional ULF waves observed in the ring current.

J. Geophys. Res. 1990. vol. 95, pp. 15113–15132. DOI: [10.1029/JA095iA09p15113](https://doi.org/10.1029/JA095iA09p15113).

Wygant J.R., Keiling A., Cattell C.A., Lysak R.L., Temerin M., Mozer F.S., et al. Evidence for kinetic Alfvén waves and parallel electron energization at 4–6 RE altitudes in the plasma sheet boundary layer. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, p. 1201. DOI: [10.1029/2001JA900113](https://doi.org/10.1029/2001JA900113).

Yeoman T., Tian M., Lester M., Jones T.B. A study of Pc5 hydromagnetic waves with equatorward phase propagation. *Planetary and Space Sci.* 1992, vol. 40, no. 6. pp. 797–810.

Yeoman T.K., Wright D.M. ULF waves with drift resonance and drift-bounce resonance energy sources as observed in artificially-induced HF radar backscatter. *Ann. Geophys.* 2000, vol. 19, pp.159–170.

URL: <http://supermag.jhuapl.edu/mag> (accessed March 12 2020).

URL: <http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/magdas> (accessed March 12 2020).

URL: http://themis.ssl.berkeley.edu/gmag_desc.shtml (accessed March 12 2020).

URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> (accessed March 12 2020).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/data-access.html> (accessed March 12 2020).

URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/filtfilt.html> (accessed March 12 2020).

Как цитировать эту статью

Моисеев А.В., Стародубцев С.А., Мишин В.В. Особенности возбуждения и распространения по азимуту и меридиану длиннопериодных P₁₃ 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).