

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ $Pi3$

© 2021 г. Н. А. Куражковская¹, *, Б. И. Клайн¹

¹Геофизическая обсерватория Борок филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, п. Борок, Ярославская обл., Россия

*e-mail: knady@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 05.03.2020 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Приведены результаты статистического исследования поляризационных характеристик иррегулярных геомагнитных пульсаций $Pi3$, наблюдаемых в полярных областях магнитосферы, и влияния на них межпланетных условий. В работе использовались одноминутные цифровые наблюдения магнитного поля двух обсерваторий: о. Хейса (HIS, $\Phi' = 74.80^\circ$, $\Lambda' = 144.46^\circ$) и Мирный (MIR, $\Phi' = -76.93^\circ$, $\Lambda' = 122.92^\circ$). Показано, что для пульсации $Pi3$ характерны правая, левая и смешанная поляризация (R -, L - и $R\&L$ -типы). Независимо от типа поляризации пульсации $Pi3$ наблюдались преимущественно в ночном секторе магнитосферы на заключительной стадии взрывной фазы суббури. Показано, что длительность временной задержки между моментом начала суббури и появлением пульсаций $Pi3$ существенно зависит от их типа поляризации. В HIS и MIR не выявлено зависимости основных характеристик (амплитуды, частоты, эллиптичности и угла наклона главной оси эллипса поляризации) пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов от локального времени. В HIS пульсации $Pi3$ R - и $R\&L$ -типов наблюдаются преимущественно во время медленных течений солнечного ветра, а L -типа в период высокоскоростных потоков из корональных дыр. В MIR пульсации $Pi3$ трех типов поляризации наблюдаются преимущественно во время высокоскоростных потоков солнечного ветра. Показано, что мелкомасштабные замкнутые структуры магнитного поля в потоке медленного и быстрого течений солнечного ветра определяют тип поляризации пульсаций $Pi3$. Установлено, что возбуждение пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов происходит при разной степени плазменной турбулентности в хвосте магнитосферы.

DOI: 10.31857/S0016794021010107

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие суббурь в ночном секторе магнитосферы сопровождается возбуждением иррегулярных геомагнитных пульсаций в широком диапазоне периодов. Так, репером взрывной фазы суббурь являются пульсации $Pi2$, имеющие вид затухающего цуга, либо каплеобразную форму [Saito, 1969; Olson, 1999]. Периоды пульсаций $Pi2$ составляют $T \sim 40$ – 150 с, их продолжительность варьирует от 5 до 15 мин. Максимум частоты появления и амплитуды пульсаций $Pi2$ наблюдается вблизи полночи в авроральных широтах. Кроме того, во время суббурь наблюдаются более длиннопериодные иррегулярные пульсации $Pi3$ с периодами $T > 150$ с. В обзоре [Saito, 1978] пульсации $Pi3$ разделены на два вида: Pip (polar irregular pulsation) [Распопов и др., 1971] и $Ps6$ [Saito, 1974], которые различаются по диапазону периодов, интенсивности, суточной вариации, области наблюдения и другим морфологическим признакам. Например, иррегулярные пульсации Pip

имеют периоды < 400 с, тогда как диапазон периодов $Ps6$ больше, чем 400 – 600 с. На земной поверхности амплитуды пульсаций Pip примерно сравнимы по величине во всех трех компонентах магнитного поля (H , D , Z). Интенсивность $Ps6$ доминирует в D – компоненте магнитного поля. Возбуждение Pip характерно для предполуночных часов, тогда как $Ps6$ преимущественно наблюдаются в послеполуночном и утреннем секторах магнитосферы [Пудовкин и др., 1976].

Однако в работе [Nagano et al., 1981] замечено, что пульсации $Pi3$, имеющие периоды больше, чем Pip и отличающиеся по некоторым признакам от $Ps6$, наблюдаются в высоких широтах гораздо чаще, чем эти два вида пульсаций. В связи с этим длиннопериодные иррегулярные пульсации, связанные с авроральной активностью, во многих исследованиях рассматривают как пульсации $Pi3$, не разделяя их на два типа, например, [Клейменова и др., 1998; Белуховский и др., 2015].

В настоящее время в геофизической литературе обсуждается несколько альтернативных механизмов генерации этого вида пульсаций. Так, согласно [Nagano et al., 1981] пульсации $Pi3$ связаны с турбулентностью магнитосферно-ионосферной системы. Одним из источников пульсаций $Pi3$, наблюдаемых в полярной шапке, может быть турбулентность магнитослоя [Yagova et al., 2004]. В работе [Клейменова и др., 1998] предполагается, что возбуждение локальных по широте иррегулярных всплесков $Pi3$ может происходить в ионосфере вследствие интенсификации крупномасштабных трехмерных электрических токов во время суббури. Одновременные наблюдения высыпаний энергичных электронов, всплесков риометрического поглощения и геомагнитных пульсаций диапазона $Pi3$ в ночном секторе высоких широт во время развития суббурь косвенно свидетельствуют о том, что областью генерации локальных $Pi3$ служит ионосфера [Козырева и др., 2009]. В некоторых работах предполагается, пульсации $Pi3$, наблюдающиеся в ночные часы, имеют дневные источники. Так, в работе [Matsuoka et al., 1995; Han et al., 2007] исследовано влияние резких изменений динамического давления солнечного ветра на процессы глобального возбуждения пульсаций $Pi3$. В качестве механизма возбуждения пульсаций $Pi3$ также рассматривают собственные колебания хвоста магнитосферы в диапазоне периодов несколько минут [Нусинов, 1971; Белуховский и др., 2015]. Таким образом, несмотря на то, что основные характеристики и особенности пульсаций $Pi3$ известны давно, механизмы их возбуждения продолжают оставаться объектом интенсивных исследований и дискуссий.

Пульсации $Pi3$, также как и пульсации $Pi2$ являются волновой структурой суббури. В связи с этим исследование морфологических особенностей пульсаций $Pi3$ представляет интерес как для идентификации источника колебаний и понимания механизма их генерации, так и для изучения природы самих суббурь. Одним из каналов получения информации о механизме и области генерации пульсаций являются их спектральные и поляризационные характеристики. Поляризация пульсаций $Pi3$, а также пульсаций $Ps6$, относящихся к классу $Pi3$, исследовалась в некоторых работах, например, [Saito and Yumoto, 1978; Saito, 1978; Suzuki et al., 1981]. Авторы этих работ ограничивались анализом годографов пульсаций $Pi3$, на основании которых определялся только их тип поляризации (правая, левая или смешанная). Однако количественные характеристики поляризации (эллиптичность, наклон главной оси эллипса поляризации) пульсаций $Pi3$ не исследовались. Также не анализировались межпланетные условия во время возбуждения пульсации $Pi3$ различных типов поляризации.

Целью настоящей работы является исследование поляризационных характеристик геомагнитных пульсаций $Pi3$, наблюдаемых в высоких широтах северного и южного полушарий Земли во время развития суббурь, и анализ условий межпланетной среды, благоприятных для их возбуждения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Для анализа поляризационных характеристик геомагнитных пульсаций $Pi3$ использовались данные наблюдений магнитного поля с одноминутным разрешением двух высокоширотных обсерваторий северного и южного полушарий: о. Хейса (код HIS, исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = 74.80^\circ$, $\Lambda' = 144.46^\circ$) за период 1997–1998 гг. и Мирный (код MIR, исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = -76.93^\circ$, $\Lambda' = 122.92^\circ$) за период 1995–1998 г.г. из Мирового Центра Данных по Солнечно-земной физике (Москва) (http://www.wdcb.ru/stp/data/geo_min.val/). Исследование условий межпланетной среды и геомагнитной активности для случаев наблюдения пульсаций $Pi3$ проводилось по среднечасовым и минутным данным параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), данным геомагнитных индексов (Kp , AL , AE , Dst), полученным из базы данных OMNI 2 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). Краткое описание OMNI 2 приведено в работе [King and Papitashvili, 2005]. Дополнительно использовался “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2002 гг.”, представленный на сайте Института космических исследований РАН (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>). Описание этого каталога дано в работе [Ермолаев и др., 2009].

По данным регистрации магнитного поля в обс. о. Хейса и Мирный было отобрано 306 и 416 случаев наблюдений пульсаций $Pi3$, соответственно. Исследование характеристик поляризации пульсаций проводилось в плоскости $H-D$ компонент. Предварительно исходные данные наземных магнитных наблюдений фильтровались в полосе частот (1.3–3.4) мГц. Далее на основе метода быстрого преобразования Фурье [Kodera et al., 1977] проводился спектрально-временной анализ отфильтрованных данных. Для каждого случая наблюдений пульсаций $Pi3$ строилась полная спектральная плотность исходного сигнала, а также его правополяризованной и левополяризованной моды. Тип поляризации волновых пакетов пульсаций $Pi3$ идентифицировался по полученным динамическим спектрам, следующим образом. Если преобладала спектральная плотность правополяризованной или левополяризованной моды, то пульсации $Pi3$ считались правополяри-

зованными (*R*-тип) или левополяризованными (*L*-тип), соответственно. Когда спектральные плотности правополяризованной и левополяризованной моды были сравнимы по величине, то пульсации *Pi3* относились к смешанному типу поляризации (*R&L*-тип). Исходя из типа поляризации пульсаций *Pi3*, исходные выборки на каждой из обсерваторий были разбиты на три группы: 1) пульсации *Pi3 R*-типа, 2) пульсации *Pi3 L*-типа и 3) пульсации *Pi3 R&L*-типа. В качестве характеристик поляризации пульсаций *Pi3* еще рассматривались эллиптичность (ϵ) – отношение малой полуоси эллипса поляризации к большой полуоси и угол наклона (τ) главной оси эллипса поляризации к оси *D*.

Дополнительно для всех случаев наблюдений пульсаций *Pi3* рассматривались следующие характеристики: 1) максимальная амплитуда (*A*) пульсаций *Pi3*, которая находилась из выражения: $A = \sqrt{H^2 + D^2}$, где *H* и *D* – максимальные значения меридиональной и азимутальной составляющих магнитного поля; 2) продолжительность волнового пакета пульсаций *Pi3* (*t*); 3) частота (*f*), соответствующая максимальной спектральной плотности; 4) временной сдвиг (Δt) между началом суббури и началом пульсаций *Pi3*. Далее проводилось статистическое исследование характеристик пульсаций *Pi3* трех групп, наблюдаемых в обсерваториях о. Хейса и Мирный.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Общая характеристика пульсаций *Pi3* разных типов поляризации

На рисунке 1 приведены примеры определения типа поляризации пульсаций *Pi3* по динамическим спектрам: (а) пульсации *Pi3 R*-типа (09.11.1997 г.), *L*-типа (25.01.1998 г.) и *R&L*-типа (17.03.1997 г.), наблюдаемые в HIS; (б) пульсации *Pi3 R*-типа (01.07.1997 г.), *L*-типа (21.06.1998 г.) и *R&L*-типа (29.11.1995 г.), наблюдаемые в MIR. Для каждого случая наблюдения в верхней части рисунка представлена магнитограмма пульсаций *Pi3* (*H*-компонента). Ниже приведена динамика *AL*-индекса, отражающего интенсивность западной электроструи в авроральном овале. Считается, что отрицательные бухты в динамике *AL*-индекса продолжительностью более 20 минут и минимальной величиной *AL*-индекса ниже -100 нТл соответствуют развитию магнитосферных суббурь [Hsu and McPherron, 2007]. Как видно из приведенных примеров (рис. 1), пульсации *Pi3* в двух полушариях наблюдались во время развития суббури в ночном секторе магнитосферы, о чем свидетельствуют отрицательные бухты в динамике *AL*-индекса. Кроме того, на рис. 1 показаны динамические спектры полной спектральной плотности, а также спектральной плотности пра-

вополяризованной и левополяризованной моды пульсаций *Pi3*, которые использовались для определения типа поляризации пульсаций.

Типичные пульсации *Pi3*, как в HIS, так и в MIR имели, в основном, вид каплеобразных волновых пакетов, продолжительность которых варьировала от 30 до 135 мин в HIS и от 20 до 150 мин в MIR. Амплитуда пульсаций *Pi3* изменялась в широком диапазоне от десятков до нескольких сотен нанотесла. В отдельных случаях амплитуда пульсаций *Pi3* превышала 1000 нТл. В HIS отмечены случаи наблюдения пульсаций *Pi3* с амплитудами более 2000 нТл. Интенсивность пульсаций *Pi3* по *D* компоненте была в основном выше, чем по *H* компоненте, как в HIS, так и в MIR. Максимум спектральной плотности *Pi3* трех типов поляризации принадлежал диапазону частот $f \sim 1.4\text{--}3.0$ мГц и $f \sim 1.4\text{--}3.4$ мГц в HIS и MIR, соответственно. Эллиптичность пульсаций *Pi3* изменялась в пределах $\epsilon \sim 0.06\text{--}0.49$ и $\epsilon \sim 0.05\text{--}0.38$, в HIS и MIR, соответственно. Величина угла τ изменялась в широком диапазоне от 0° до 180° .

В таблице 1 приведено число (*N*) проанализированных случаев и средние характеристики пульсаций *Pi3* правой, левой и смешанной поляризации в HIS и MIR. Из таблицы 1 видно, что в обоих полушариях в доминирующем числе случаев наблюдаются пульсации *Pi3 R*-типа. Средние амплитуды пульсаций *Pi3* в HIS были значительно выше, чем в MIR независимо от типа поляризации пульсаций. Продолжительности волновых пакетов *Pi3* были примерно одинаковы в двух полушариях, и в среднем составляла 64–68 мин. Максимум спектральной плотности волновых пакетов пульсаций *Pi3* независимо от типа поляризации соответствовал средней частоте 2.1–2.2 мГц и 2.3 мГц, соответственно в HIS и MIR (табл. 1). Среднее значение эллиптичности ($\epsilon = 0.19$) было примерно одинаковым для трех типов поляризации как в HIS, так и в MIR. Главная ось эллипса поляризации пульсаций *Pi3* располагалась вблизи *D* – компоненты в HIS и MIR. Однако средние значения углов наклона главной оси эллипса поляризации к оси *D* (τ) были различны в HIS и MIR. Так, в HIS средняя величина τ была $\geq 90^\circ$, тогда как в MIR $\tau < 90^\circ$ для всех типов поляризации пульсаций *Pi3* (табл. 1)

3.2. Суточная вариация характеристик пульсаций *Pi3* разных типов поляризации, наблюдаемых в HIS и MIR

Пульсации *Pi3* трех типов поляризации в HIS и MIR наблюдались преимущественно в интервале времени (18:00–04:00) MLT. На рисунке 2 показаны суточные вариации некоторых характеристик пульсаций *Pi3 R*-, *L*- и *R&L*-типов, наблюдаемых в HIS и MIR: частоты наблюдения – *N*, амплитуды – *A*, частоты максимальной спектральной

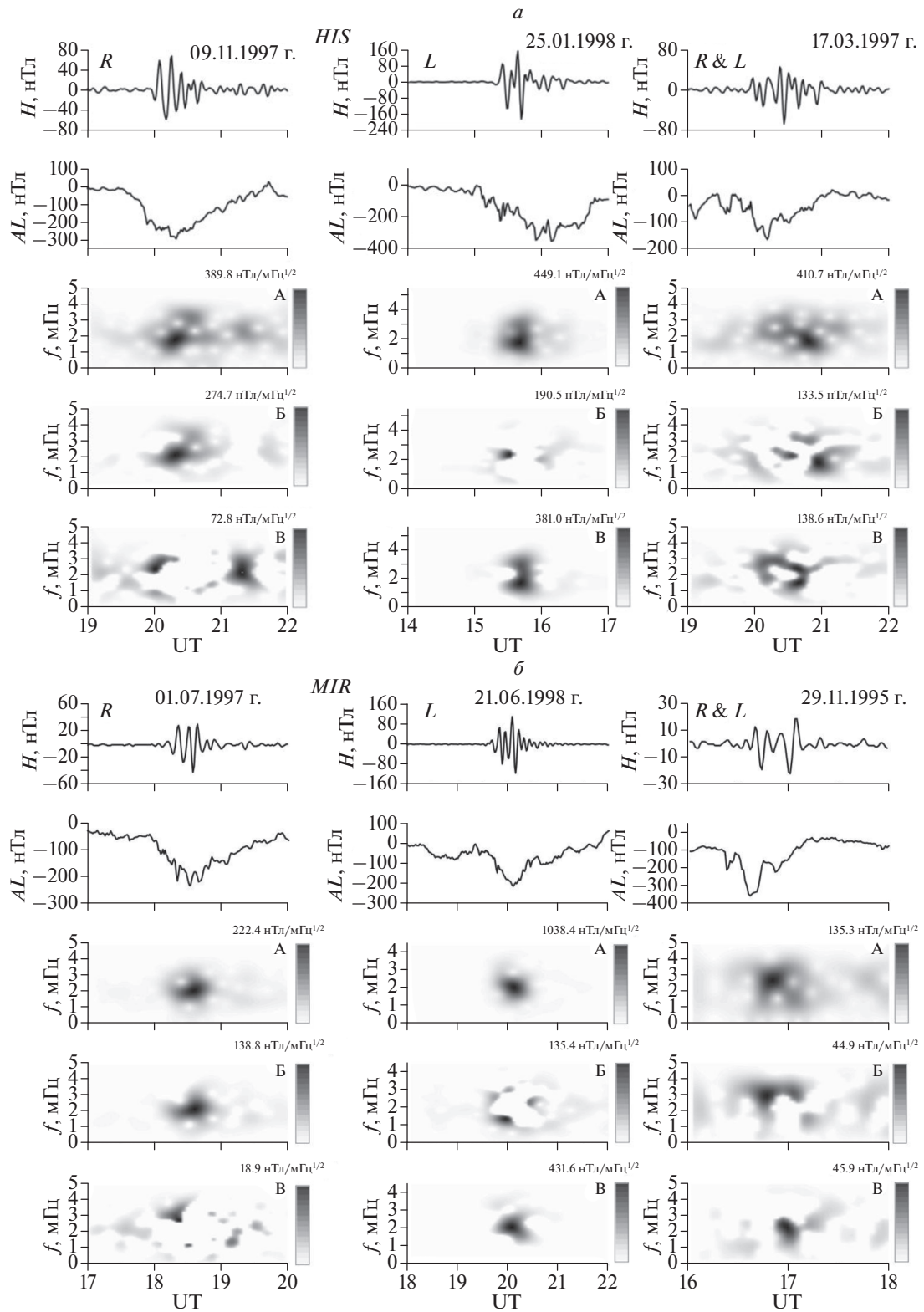


Рис. 1. Типичные примеры наблюдения пульсаций $Pi3$ (H -компонента) в обсерваториях о. Хейса и Мирный: (а) пульсации $Pi3$: R -типа (09.11.1997 г.), L -типа (25.01.1998 г.) и $R\&L$ -типа (17.03.1997 г.), наблюдаемые в HIS; (б) пульсации $Pi3$: R -типа (01.07.1997 г.), L -типа (21.06.1998 г.) и $R\&L$ -типа (29.11.1995 г.), наблюдаемые в MIR. Ниже на всех графиках приведены динамика AL -индекса, полная спектральная плотность пульсаций $Pi3$ (панель А), спектральная плотность правополяризованной (панель Б) и левополяризованной моды исходного сигнала (панель В).

Таблица 1. Средние характеристики пульсаций $Pi3$ различных типов поляризации в обсерваториях о. Хейса и Мирный

Характеристики	<i>HIS-R</i>	<i>HIS-L</i>	<i>HIS-R&L</i>	<i>MIR-R</i>	<i>MIR-L</i>	<i>MIR-R&L</i>
N	140	107	59	238	129	49
A , нТл	379.9 ± 36.4	566.9 ± 68.3	354.5 ± 60.5	277.9 ± 17.8	342.1 ± 24.6	312.4 ± 40
t , мин	65.4 ± 1.7	64.0 ± 2.1	68.5 ± 3.3	65.5 ± 1.6	63.3 ± 1.9	67.6 ± 3.5
f , мГц	2.2 ± 0.02	2.1 ± 0.03	2.1 ± 0.04	2.3 ± 0.02	2.3 ± 0.02	2.3 ± 0.04
ϵ	0.20 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.01
τ , град	90.1 ± 4.4	95.1 ± 5.2	102.1 ± 7.2	85.6 ± 2.4	85.8 ± 4.0	78.0 ± 6.3

плотности — f , эллиптичности — ϵ , угла наклона главной оси эллипса поляризации — τ . Видно, что суточные вариации N пульсаций $Pi3$ разных типов поляризации асимметричны относительно полуночного меридиана как в *HIS*, так и *MIR*. В *HIS* (рис. 2а) правополяризованные пульсации $Pi3$ наблюдаются преимущественно после полночи (00:00–01:00) MLT, а левополяризованные до полночи (20:00–21:00) MLT. Распределение частоты появления N пульсаций $Pi3$ смешанной поляризации имеет два максимума, один из которых наблюдается перед полночью (22:00–23:00) MLT, другой после полночи (00:00–01:00) MLT. Максимум частоты наблюдений пульсаций $Pi3$ в *MIR* (рис. 2б) приходится на предполуночный сектор (22:00–23:00) MLT полярных широт независимо от типа поляризации. Иными словами в *MIR* в отличие от *HIS* не наблюдается смены типа поляризации пульсаций $Pi3$ вблизи полуночного меридиана. Из рисунка 2 также видно, что основные характеристики (A и f) волновых пакетов пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов, а также характеристики их поляризации (ϵ и τ) не зависят от локального времени в *HIS* и *MIR*.

3.3. Временные задержки начала пульсаций $Pi3$ от начала суббурь

Все анализируемые случаи пульсаций в *HIS* и *MIR* наблюдались в период развития суббурь на ночной стороне магнитосферы. Максимальная интенсивность суббурь, характеризуемая величиной AE -индекса, была преимущественно >400 нТл, и в некоторых случаях достигала 1000 нТл и более. Пульсации $Pi3$, главным образом, начинались на заключительной стадии фазы развития суббурь. Одновременное сопоставление наблюдений пульсаций $Pi3$ и динамики AL -индекса показало, что их начало запаздывало относительно начала суббурь. На рисунке 3 приведены распределения времен запаздывания (Δt) начала пульсаций $Pi3$ разных типов поляризации, наблюдаемых в *HIS* и *MIR*, от начала суббурь. Из распределений видно, что величина Δt варьировала от -80 до 240 мин. Отрицательные значения Δt означают, что в некоторых случаях пульсации $Pi3$ начинались до нача-

ла суббурь. Обращают на себя внимание две закономерности поведения Δt в двух полушариях: (1) в *MIR* в доминирующем числе случаев время запаздывания пульсаций R -, L - и $R\&L$ -типов составляет 40, 60 и 40 мин, соответственно, что существенно выше, чем в *HIS* (20, 40 и 20 мин); (2) время запаздывания начала пульсаций $Pi3$ левой поляризации в *HIS* и *MIR* больше, чем в случае правой и смешанной поляризации.

3.4. Зависимость частоты наблюдения пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов в *HIS* и *MIR* от геомагнитной активности, параметров плазмы солнечного ветра и ММП

Исследование магнитосферной активности во время наблюдения пульсаций $Pi3$ проводилось по данным индексов Kp , AE и Dst , которые отражали планетарную возмущенность, активность суббурь и интенсивность кольцевого тока во время магнитных бурь, соответственно. Величина Kp -индекса бралась, как принято в базе данных OMNI. Анализ межпланетных условий, на фоне которых наблюдались пульсации $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов в *HIS* и *MIR* проводился по среднечасовым и одноминутным данным параметров плазмы солнечного ветра и ММП. Рассматривались следующие характеристики межпланетной среды: модуль напряженности B ; углы θ (широта θ — угол между вектором B и его проекцией на плоскость эклиптики) и ϕ (долгота ϕ — угол между проекцией вектора B на плоскость эклиптики и B_x -компонентой ММП), характеризующих направление вектора ММП в плоскости эклиптики и плоскости ей перпендикулярной; компоненты ММП (B_x -, B_y -, B_z -), концентрация n ; скорость V ; динамическое давление солнечного ветра $P_{dyn} = \rho V^2$ (ρ — плотность плазмы); E_y — компонента электрического поля солнечного ветра ($E_y = -VB_z$); отношение плотности альфа-частиц к плотности протонов Na/Np ; параметр β , характеризующий отношение теплового давления к магнитному и альвеновское число Маха Ma . Все параметры рассматривались в солнечно-эклиптической системе координат.

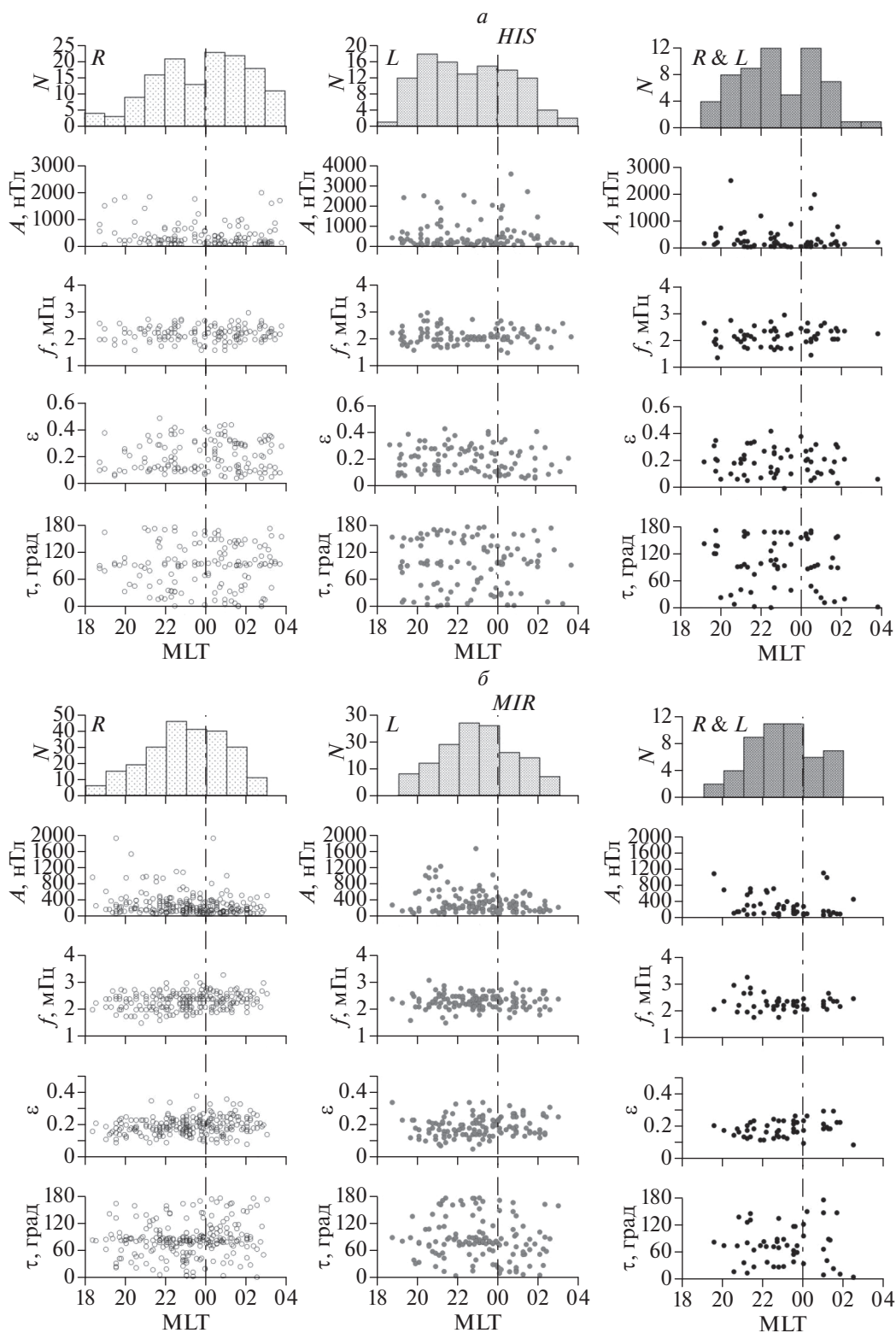


Рис. 2. Суточная вариация частоты наблюдения — N , амплитуды — A , частоты максимальной спектральной плотности — f , эллиптичности — ε , угла наклона главной оси эллипса поляризации — τ пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R \& L$ -типов в HIS (а) и MIR (б).

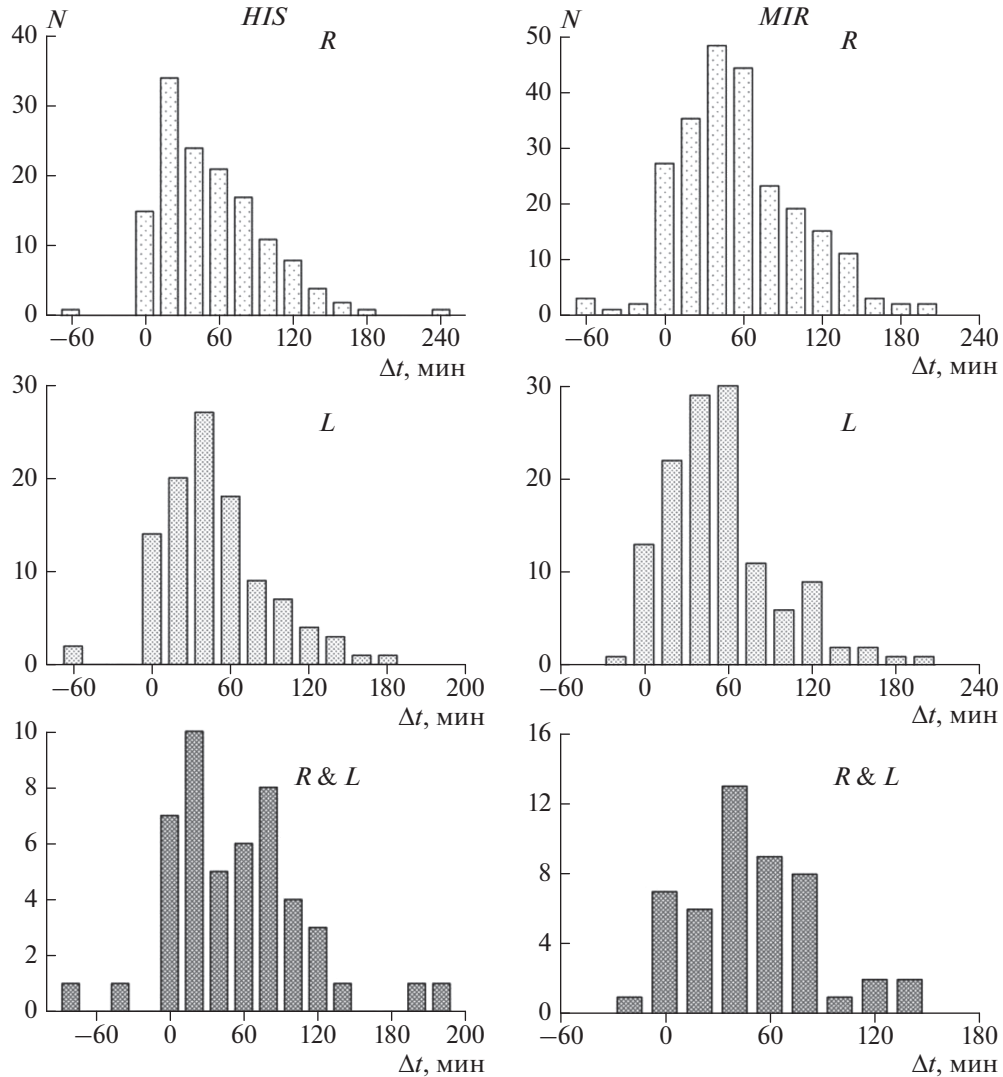


Рис. 3. Распределения времен запаздывания начала пульсаций $Pi3$ от начал суббурь для трех типов поляризации в HIS и MIR.

Средние оценки параметров выполнены по тем часовым интервалам, во время которых наблюдались пульсации $Pi3$ различных типов поляризации. В табл. 2 представлены средние значения и стандартные ошибки среднего индексов геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и ММП во время наблюдения пульсаций $Pi3$ различных типов поляризации в HIS и MIR. Из таблицы 2 видно, что средние значения Kp -, AE - и Dst -индексов соответствовали условиям умеренно-возмущенной магнитосферы и развитию умеренных по интенсивности суббурь во время наблюдения пульсаций $Pi3$, как в северном, так и южном полушарии. Формирование пульсаций $Pi3$ происходило при параметрах солнечного ветра и ММП, которые не сильно отличались для разных типов поляризации. И более того, средние параметры межпланетной среды для случаев на-

блюдения пульсаций $Pi3$ в HIS и MIR были примерно сравнимы по величине. Исходя из приведенных оценок (табл. 2), можно предположить, что тип поляризации пульсаций $Pi3$ не зависит от величины параметров солнечного ветра и ММП. Также не обнаружено корреляционной связи между параметрами межпланетной среды и какими-либо характеристиками пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R \& L$ -типов, наблюдаемых в HIS и MIR. Отсутствие связи характеристик пульсаций $Pi3$ с параметрами солнечного ветра и ММП может указывать на то, что генерация суббурь и связанное с ними возбуждение пульсаций $Pi3$ скорее определяется внутренними процессами в магнитосфере Земли.

Таким образом, количественные характеристики плазмы солнечного ветра и ММП и интенсивность суббурь во время возбуждения pulsa-

Таблица 2. Средние значения индексов геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и ММП во время наблюдения пульсаций *Pi3* различных типов поляризации в обсерваториях о. Хейса и Мирный

Параметры	<i>HIS-R</i>	<i>HIS-L</i>	<i>HIS-R&L</i>	<i>MIR-R</i>	<i>MIR-L</i>	<i>MIR-R&L</i>
<i>Kp</i>	29 ± 1	31 ± 1	29 ± 1	32 ± 1	32 ± 1	31 ± 2
<i>AE</i> , нТл	422 ± 23	450 ± 24	433 ± 34	471 ± 17	453 ± 20	438 ± 35
<i>Dst</i> , нТл	-25.8 ± 1.9	-28.2 ± 2.0	-26.2 ± 2.9	-26.0 ± 1.1	-27.3 ± 1.6	-22.3 ± 2.2
<i>B</i> , нТл	6.5 ± 0.3	6.8 ± 0.3	6.6 ± 0.5	6.6 ± 0.2	6.3 ± 0.2	6.2 ± 0.4
θ , °	-18.5 ± 2.3	-15.4 ± 2.6	-16.6 ± 3.1	-14.4 ± 1.7	-14.6 ± 2.1	-13.2 ± 3.9
φ , °	209.7 ± 8.4	202.9 ± 9.0	218.5 ± 12.9	218.9 ± 6.4	197.4 ± 8.9	178.0 ± 14.9
<i>Bx</i> , нТл	0.2 ± 0.3	-0.1 ± 0.3	0.2 ± 0.5	0.2 ± 0.2	0.1 ± 0.3	0.3 ± 0.5
<i>By</i> , нТл	-0.4 ± 0.4	-0.2 ± 0.3	-0.7 ± 0.6	-0.7 ± 0.3	0.3 ± 0.4	0.3 ± 0.6
<i>Bz</i> , нТл	-1.9 ± 0.2	-1.2 ± 0.3	-0.9 ± 0.4	-1.2 ± 0.2	-1.2 ± 0.2	-1.1 ± 0.3
<i>n</i> , см ⁻³	6.9 ± 0.4	5.6 ± 0.3	5.7 ± 0.5	6.5 ± 0.3	6.4 ± 0.5	6.9 ± 1.2
<i>V</i> , км/с	428.8 ± 6.5	471.3 ± 9.8	467.6 ± 12.3	488.9 ± 6.1	487.7 ± 8.0	480.3 ± 14.4
<i>Pdyn</i> , нПа	2.3 ± 0.1	2.2 ± 0.1	2.1 ± 0.1	2.7 ± 0.1	2.6 ± 0.2	2.7 ± 0.4
<i>Ey</i> , мВ/м	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.1
<i>Na/Np</i> × 100	3.3 ± 0.2	3.4 ± 0.2	3.3 ± 0.2	3.5 ± 0.1	3.3 ± 0.2	3.7 ± 0.3
β	2.5 ± 0.5	1.8 ± 0.2	1.9 ± 0.2	1.8 ± 0.1	1.9 ± 0.1	1.9 ± 0.3
<i>Ma</i>	9.6 ± 0.5	8.8 ± 0.3	9.0 ± 0.4	9.4 ± 0.2	9.8 ± 0.3	9.5 ± 0.4

ций *Pi3* разных типов поляризации в *HIS* и *MIR* практически идентичны. Анализ данных из табл. 2 свидетельствует о том, что наиболее благоприятными условиями для генерации суббурь и возбуждения пульсаций *Pi3* являются умеренно-возмущенная межпланетная среда.

3.5. Динамика усредненных компонент ММП и *AL*-индекса во время наблюдения пульсаций *Pi3* *R*-, *L*- и *R&L*-типов в *HIS* и *MIR*

Для каждой группы пульсаций *Pi3* было проведено отдельное исследование одноминутных данных параметров солнечного ветра и ММП методом наложения эпох. За реперную точку принимался момент начала пульсаций *Pi3* в *HIS* и *MIR*. Анализировались данные в течение двух часов до и двух часов после начала пульсаций *Pi3*. Первоначально отметим, что динамика таких параметров, как *B*, *n*, *V*, *P_{dyn}* была стабильна, по крайней мере, в течение двух часов до и двух часов после начала пульсаций *Pi3* трех групп. Вблизи нулевой точки отсутствовали какие-либо резкие флуктуации этих параметров, которые могли бы служить триггером пульсаций в ночной магнитосфере. Качественное поведение *B*, *n*, *V*, *P_{dyn}* было примерно одинаковым для случаев наблюдения пульсаций *Pi3* как в *HIS*, так и *MIR*. Здесь мы не будем приводить полученные вариации этих параметров солнечного ветра. Наиболее переменными параметрами вблизи момента начала пульсаций *Pi3* оказались компоненты ММП, динами-

ка которых для разных типов поляризации *Pi3*, наблюдаемых в *HIS* и *MIR*, была различной.

На рисунке 4 показана усредненная вариация *Bx*-, *By*-, *Bz*-компонент ММП и динамика *AL*-индекса, полученная методом наложения эпох. Как видно из рис. 4, *Bx*-, *By*-компоненты изменяются по величине и направлению как до начала пульсаций *Pi3*, так и после. Наиболее существенные различия видны в динамике *Bx*-, *By*-компонент во время наблюдения пульсаций *Pi3* *L*- и *R&L*-типов, которые проявляются в смене направления компонент вблизи реперной точки. Динамика *Bz*-компоненты для случаев наблюдения пульсаций *Pi3* *R*-, *L*- и *R&L*-типов в двух полушариях подобна. Пульсации *Pi3* начинаются через ~45–60 мин после достижения *Bz*-компонентой ММП максимальной отрицательной величины. Иными словами, независимо от типа поляризации начало пульсаций *Pi3* приходится на фазу восстановления *Bz*-компоненты, когда уже начался поворот вектора ММП от южного направления к северному. Согласно усредненной вариации *AL*-индекса в это время наблюдается заключительная стадия взрывной фазы суббури в ночном секторе магнитосферы. При этом динамика *AL*-индекса примерно одинакова для всех типов поляризации пульсаций *Pi3*, наблюдаемых в *HIS* и *MIR* (рис. 4).

Наиболее четко изменчивое поведение *Bx*- и *By*-компонент ММП для разных типов поляризации *Pi3* проявляется в годографах вектора магнитного поля *B* в проекции на плоскость эклиптики. На рисунке 5 представлены среднестатистические годографы вектора *B* на плоскости *XY*

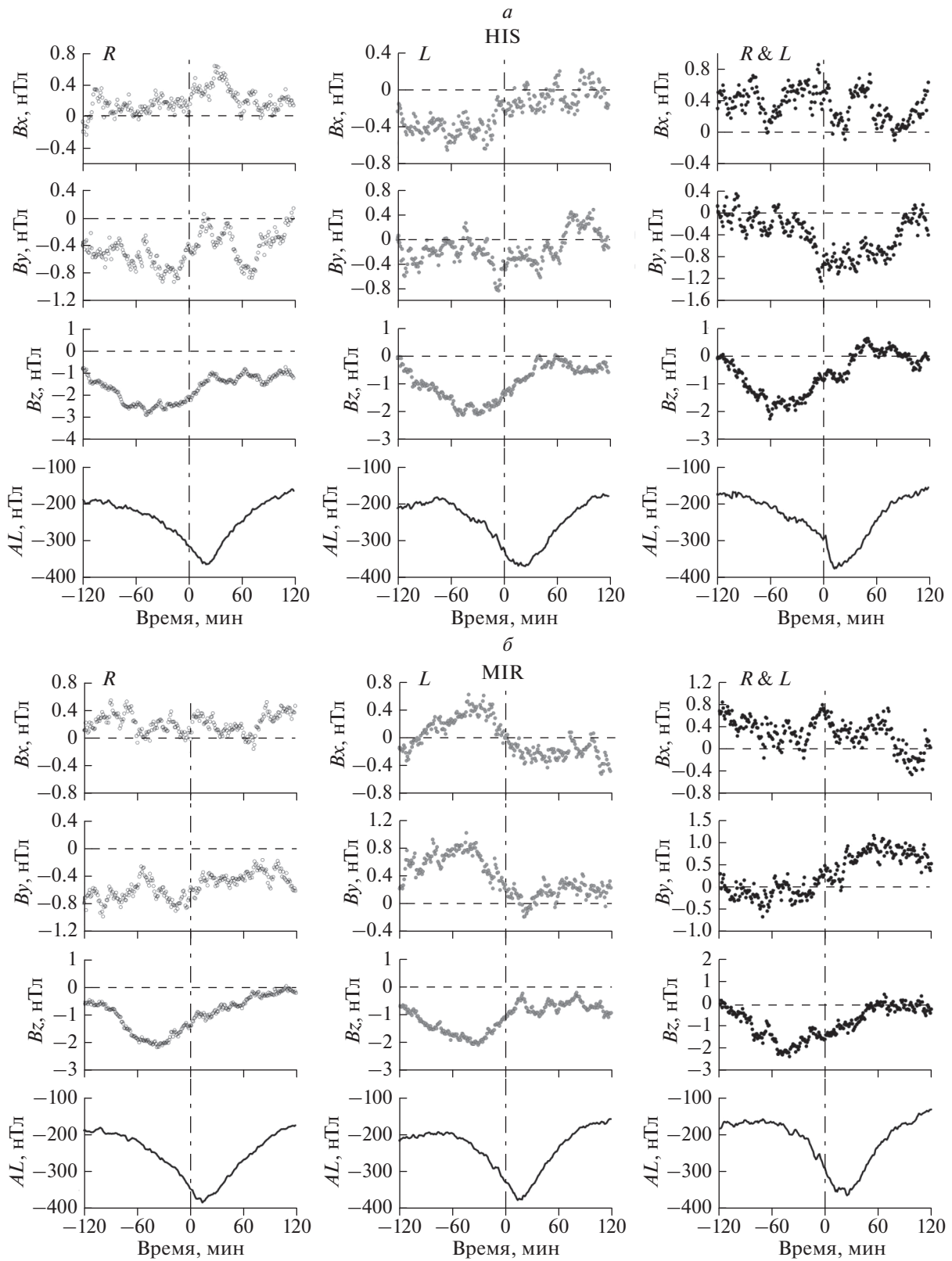


Рис. 4. Динамика V_x -, V_y -, V_z -компонент ММП и AL -индекса, полученная методом наложения эпох для случаев наблюдения пульсаций $Pi3$ R-, L- и R&L-типов в HIS (a) и MIR (б).

солнечно-эклиптической системы координат для случаев наблюдения пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R&L$ -типов в HIS и MIR. Годографы строились по усредненным одноминутным данным V_x - и V_y -компонент ММП в течение 4-х ч (2 ч до и 2 ч после момента начала пульсаций $Pi3$). Из рисунка 5а, 5б видно, что в HIS пульсации $Pi3$ R - и L -типов поляризации наблюдаются при направлении вращения вектора напряженности ММП в плоскости эклиптики по часовой стрелке и против часовой стрелки, соответственно. Однако для пульсаций $Pi3$ в MIR характерна обратная тенденция, а именно $Pi3$ правой и левой поляризации наблюдаются при вращении вектора напряженности ММП в плоскости эклиптики против часовой стрелки и по часовой стрелке, соответственно (рис. 5г, 5д). Для пульсаций $Pi3$ $R&L$ -типа соответствует смешанное направление вращения вектора напряженности ММП в плоскости эклиптики, как в HIS, так и в MIR (рис. 5в, 5е). Полученные годографы указывают на то, что в потоке солнечного ветра силовые линии ММП имеют, скорее всего, замкнутую конфигурацию. По нашему мнению, неоднородности солнечного ветра с замкнутой конфигурацией магнитного поля и вполне определенным направлением вращения вектора напряженности B в плоскости эклиптики и формируют тип поляризации пульсаций $Pi3$, регистрируемых в полярных широтах магнитосферы.

3.6. Влияние крупномасштабных течений солнечного ветра на вероятность появления пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R&L$ -типов в HIS и MIR

Поскольку из рис. 5 следует, что ММП солнечного ветра имеет определенную конфигурацию в плоскости эклиптики при возбуждении пульсаций $Pi3$, представляется целесообразным исследовать, к каким известным крупномасштабным течениям солнечного ветра могут относиться подобные структуры. Используя “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2002 гг.”, отдельно для каждого из трех типов поляризации пульсаций $Pi3$ в HIS и MIR мы провели одновременное сравнение появления пульсаций с наблюдениями различных типов течений солнечного ветра. Гистограммы частоты наблюдения N пульсаций $Pi3$ в зависимости от течений солнечного ветра представлены на рис. 6. В результате исследования было установлено, что, по крайней мере, семь крупномасштабных течений солнечного ветра могут оказывать влияние на генерацию пульсаций $Pi3$. В HIS и MIR пульсации $Pi3$ трех типов поляризации могли наблюдаться во время: (1) медленных квазистационарных потоков плазмы солнечного ветра из корональных стримеров – SLOW, (2) высокоскоростных потоков солнечного ветра из

корональных дыр – FAST, (3) выбросов корональной массы (Coronal Mass Ejection) – CME, (4) областей сжатой плазмы на фронте быстрых течений из полярных корональных дыр и медленных течений из корональных стримеров (Corotating Interaction Region) – CIR, (5) областей сжатия перед передним фронтом поршня – SHEATH, (6) гелиосферного токового слоя (Heliospheric Current Sheet) – HCS, (7) магнитных облаков (Magnetic Cloud) – MC. Классификация типов течений солнечного ветра взята из работы [Ермолаев и др., 2009]. Однако в доминирующем числе случаев как в HIS, так и в MIR пульсации $Pi3$ наблюдались во время двух крупномасштабных квазистационарных течений солнечного ветра – SLOW и FAST. С меньшей вероятностью пульсации $Pi3$ появлялись на фоне возмущенных течений солнечного ветра. Из возмущенных течений солнечного ветра, во время которых наблюдались пульсации $Pi3$, доминировали CME. Значительно меньше случаев $Pi3$ наблюдалось во время прохождения таких потоков, как CIR, SHEATH, HCS, MC. Из рисунка 6 видно, что в HIS пульсации $Pi3$ R - и $R&L$ -типов наблюдались, главным образом, на фоне SLOW, а L -типа преимущественно на фоне FAST. В MIR пульсации $Pi3$ всех типов поляризации в большинстве случаев наблюдались на фоне FAST.

3.7. Статистика амплитуд пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R&L$ -типов в HIS и MIR

Ранее в работе [Клайн и др., 2008] было показано, что для пульсаций $Pi3$ присущи закономерности перемежающихся процессов. Кумулятивная функция распределения амплитуд всплесков $Pi3$ достаточно хорошо аппроксимировалась степенной функцией с показателем степени α , что типично для перемежаемости. Поскольку в данной работе все случаи наблюдений пульсаций $Pi3$ разбиты на три группы по типу поляризации, мы исследовали закономерности перемежаемости пульсаций R -, L - и $R&$ -типов отдельно. Согласно работе [Малинецкий и Потапов, 2000], перемежаемость тесно связана с турбулентностью среды, в которой формируются всплесковые режимы. Поэтому показатель α может быть далее использован для качественной оценки плазменной турбулентности в области генерации пульсаций. Заметим, что подобный подход мы использовали в наших предыдущих работах по исследованию закономерностей пульсаций $Pi2$, наблюдающихся во время суббурь и в их отсутствие, например, [Куражковская и Клайн, 2015].

На рисунке 7 приведены кумулятивные функции распределений $P(A)$ амплитуд пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R&L$ -типов, начиная с некоторого порогового значения A_0 , и их аппроксимации степенными функциями. В правой части каждого гра-

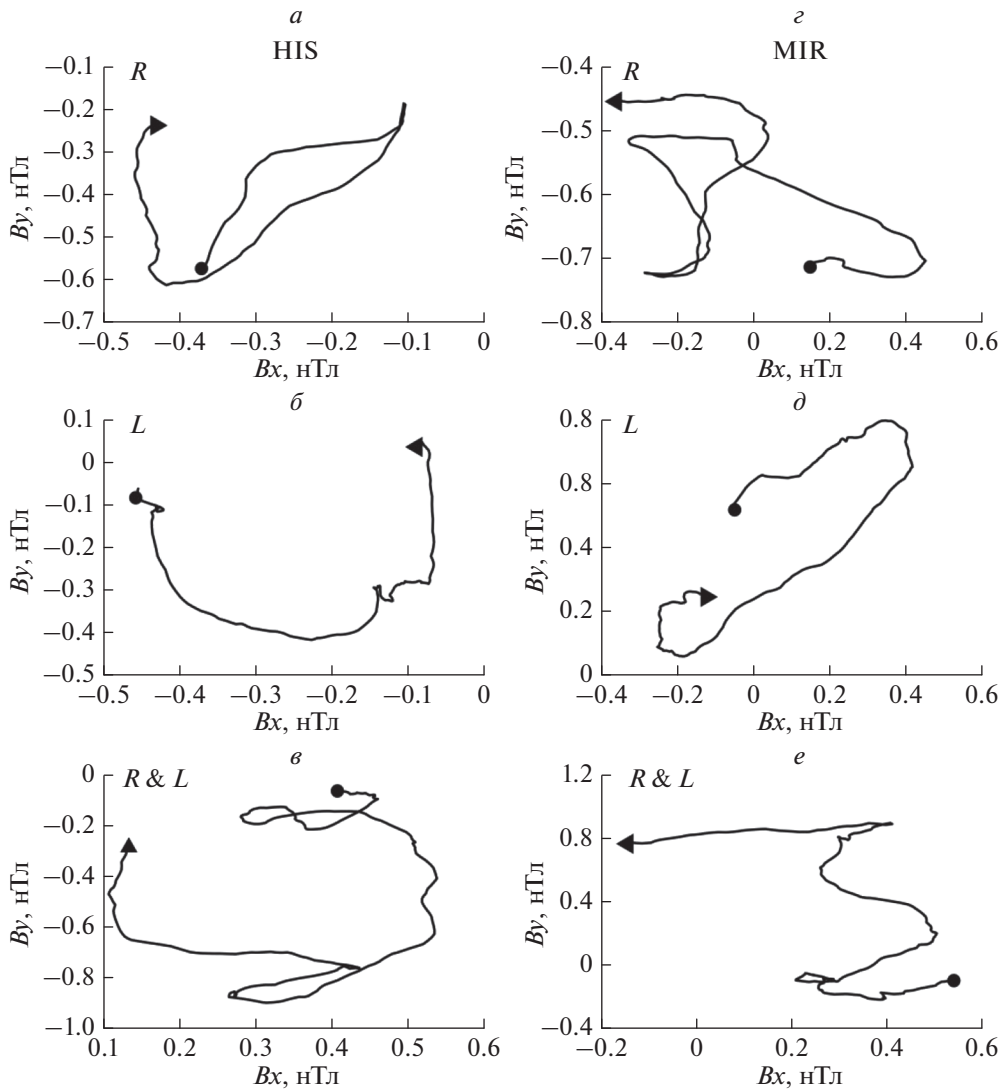


Рис. 5. Среднестатистические проекции годографов вектора V ММП на плоскость XY солнечно-эклиптической системы координат за 2 ч до и 2 ч после начала пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов в HIS и MIR. Кружки и треугольники – начало и конец годографов соответственно.

фика дано распределение $N(A)$ амплитуд пульсаций $Pi3$. Величина показателя α в северном полушарии для пульсаций $Pi3$ R -типа ($\alpha = 1.59$) существенно меньше, чем L -типа ($\alpha = 4.13$). Аналогичная тенденция наблюдается в южном полушарии. Показатель α в MIR для правополяризованных и левополяризованных $Pi3$ составляет $\alpha = 2.21$ и $\alpha = 3.03$, соответственно. Величина α для смешанного типа поляризации $Pi3$ в обоих полушариях занимает промежуточное значение $\alpha = 1.47$ и $\alpha = 1.41$, соответственно в HIS и MIR.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное статистическое исследование поляризационных характеристик геомагнитных пульсаций $Pi3$, наблюдаемых в ночном секторе

магнитосферы, показало, что данному классу пульсаций присущи три типа поляризации (правая, левая и смешенная), что согласуется с результатами [Suzuki et al., 1981]. Нами установлено, что независимо от того, к какому типу относятся пульсации $Pi3$, они обладают эллиптической поляризацией. Согласно [Kennel et al., 1988] эллиптическая, также как и круговая поляризация, типична для альвеновских волн. В связи с вышесказанным, у нас есть основания полагать, что пульсации $Pi3$ представляют собой альвеновские волны, распространяющиеся вдоль внешнего магнитного поля Земли.

В основном закономерности поляризации пульсаций $Pi3$ в HIS и MIR подобны, но имеются и некоторые различия. Необходимо отметить, что

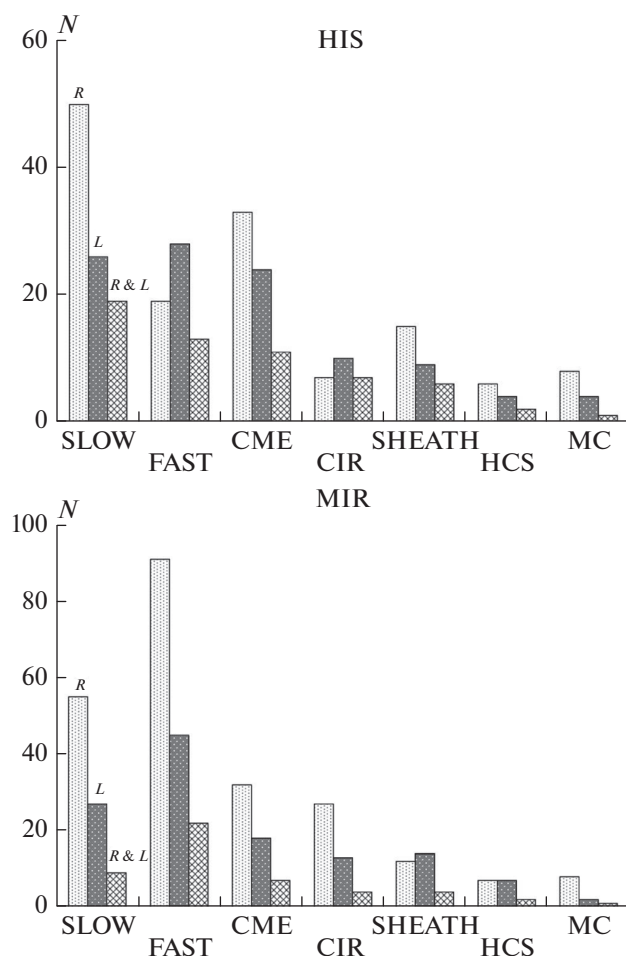


Рис. 6. Зависимость частоты наблюдения пульсаций $Pi3$ R-, L- и R&L-типов в HIS и MIR от вида потоков солнечного ветра.

в данной работе анализировались поляризационные характеристики пульсаций $Pi3$ по данным наблюдений двух обсерваторий, расположенных в приблизительно сопряженных областях (сдвинутых \sim на один часовой пояс по геомагнитной долготе и \sim на два градуса по геомагнитной широте). Однако, учитывая среднестатистическое положение ночного участка овала полярных сияний при умеренной геомагнитной активности и положение используемых обсерваторий, в ночные часы во время развития суббурь HIS, скорее всего, находилась вблизи приполюсной границы аврального овала, а MIR оказывалась в области полярной шапки. Таким образом, анализируемые пульсации $Pi3$, видимо принадлежали разным структурным образованиям магнитосферы. Отчасти это объясняет обнаруженную смену типа поляризации вблизи полуночного меридиана в HIS и ее отсутствие в MIR (рис. 2), а также различное поведение некоторых характеристик пульсации $Pi3$ в северном и южном полушариях. Это касает-

ся, например, величины временных задержек начала пульсаций от начала суббурь (рис. 3).

Известно, что потоки солнечного ветра включают в себя структуры, характеризующиеся различными пространственными и временными размерами. Причем при движении от Солнца в межпланетное пространство эти структуры могут принимать форму замкнутых образований. Некоторые из них идентифицированы по спутниковым наблюдениям, и их характеристики плазмы и магнитного поля описаны в литературе. Например, подобные структуры по терминологии авторов работ [Sarris and Krimigis, 1982] названы магнитными петлями (magnetic loops), [Klein and Burlaga, 1982] – магнитными облаками (magnetic clouds), [Marubashi, 1991] – магнитными жгутами (flux ropes). Анализ среднестатистических годовых векторов B ММП в плоскости эклиптики (рис. 5) показал, что во время регистрации пульсаций $Pi3$ R-, L- и R&L-типов в потоке солнечного ветра наблюдается замкнутая конфигурация магнитного поля, аналогичная магнитным обла-

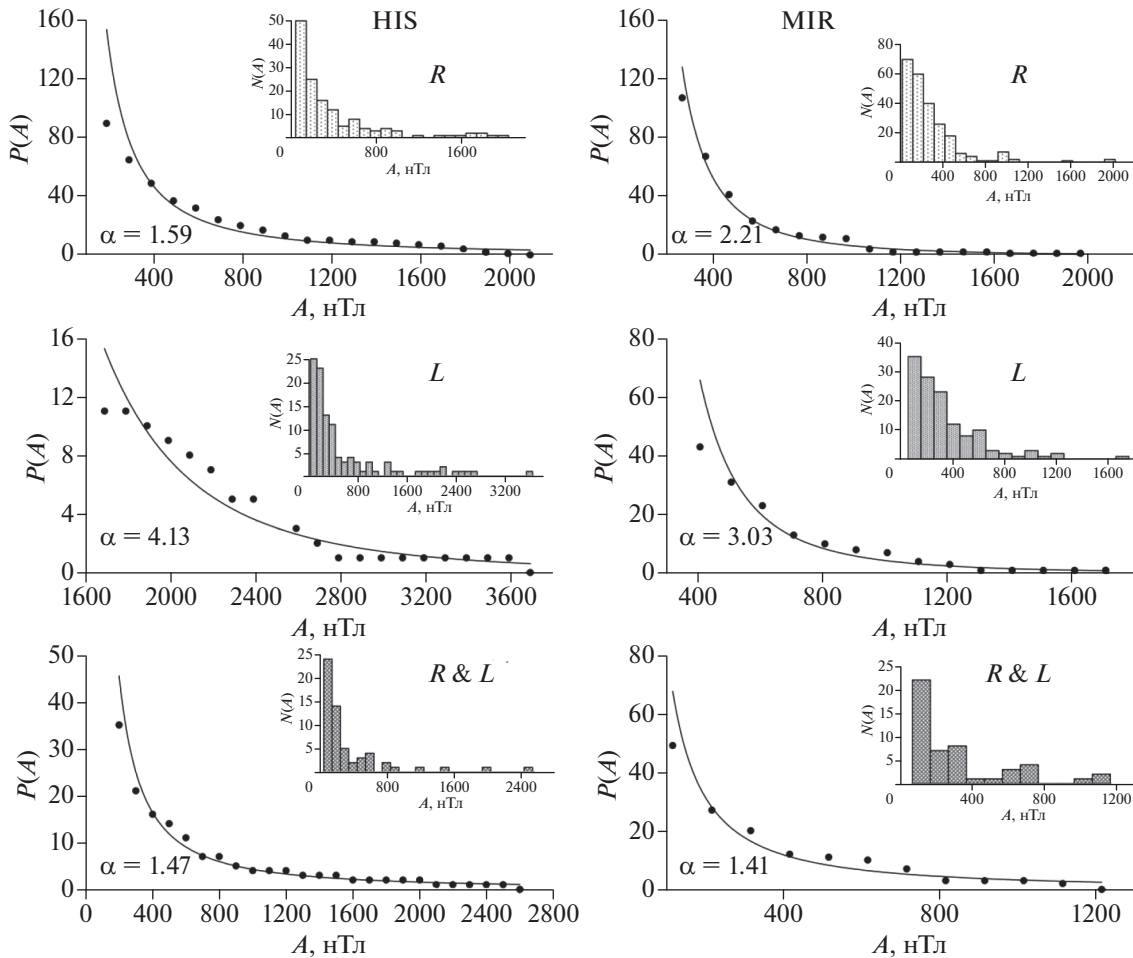


Рис. 7. Кумулятивные функции распределений $P(A)$ амплитуд пульсаций $Pi3$ R -, L - и $R\&L$ -типов в HIS и MIR (темные кружки) и их аппроксимация степенной функцией (сплошная линия). В правой части каждого графика даны исходные распределения $N(A)$ амплитуд пульсаций $Pi3$.

кам или магнитным петлям, только существенно меньших пространственных и временных масштабов. Причем подобные мелкомасштабные замкнутые структуры, по-видимому, могут присутствовать в различных крупномасштабных течениях солнечного ветра. По нашему мнению, именно замкнутые структуры и определенное направление вращения вектора напряженности ММП в них определяют различные типы поляризации пульсаций $Pi3$, регистрируемых в полярных широтах магнитосферы.

Как видно из рис. 1 и рис. 4 пульсации $Pi3$ независимо от типа их поляризации наблюдаются во время суббурь. В работе [Дэспирак и др., 2019] исследовано влияние крупномасштабных течений солнечного ветра на появление двух типов высокоширотных суббурь. Один из типов суббурь по терминологии [Клейменова и др., 2012] назван “полярные”, другой по терминологии [Дэспирак и др., 2019] — “расширенные” (аналог классических суббурь). Классические суббури, по обыкно-

вению, начинаются на широтах $<67^\circ$, и перемещаются к полюсу. “Полярные” суббури, как правило, наблюдаются на широтах $>70^\circ$. Авторы работы [Дэспирак и др., 2019] показали, что “полярные” суббури преимущественно наблюдались во время SLOW, “расширенные” суббури в период наблюдений FAST. Учитывая зависимость частоты наблюдения пульсаций $Pi3$ от течений солнечного ветра (рис. 6) и результаты работы [Дэспирак и др., 2019], можно предположить, что в HIS пульсации $Pi3$ R - и $R\&L$ -типов наблюдались преимущественно во время “полярных” суббурь, а левополяризованные $Pi3$ — в период “расширенных” суббурь. В MIR независимо от типа их поляризации пульсации $Pi3$ наблюдались, в основном, в период развития “расширенных” суббурь. Если исходить из этого предположения, то можно отметить, что временные задержки между началом “полярных” суббурь и пульсаций $Pi3$ R - и $R\&L$ -типов значительно меньше, чем Δt между началом “расширенных” суббурь и началом пуль-

саций $Pi3 L$ -типа в HIS, а также всех типов поляризации в MIR.

С другой стороны, различное время запаздывания начала пульсаций $Pi3 R$ -, L - и $R\&L$ -типов от начала суббурь может быть связано с тем, что альвеновские волны разного типа поляризации распространяются с различными скоростями. Кроме того, направление силовых линий магнитного поля Земли различно в северном и южном полушариях, что, безусловно, оказывает влияние на процесс распространения волн.

Из анализа статистики амплитуд пульсаций $Pi3$ разных типов поляризации, которая подчиняется степенному закону, следует, что величина показателей $\alpha > 1$ в HIS и MIR. Следовательно, пульсации $Pi3 R$ -, L - и $R\&L$ -типов возбуждаются в высокотурбулизованной среде. Область возбуждения пульсаций $Pi3$ (ночной сектор полярных широт), скорее всего, находится в хвосте магнитосферы, плазма которого, судя по нашим данным, сильно турбулизована. Последнее указывает на то, что магнитное пересоединение, являющееся физическим процессом, ответственным за развитие суббурь в хвосте магнитосферы, сопровождается плазменной турбулентностью и, следовательно, можно говорить о том, что пересоединение в хвосте — трехмерное. Теоретические аспекты трехмерного турбулентного магнитного пересоединения активно обсуждаются в литературе, например, [Lazarian and Vishniac, 1999; Зеленый и др., 2016]. Анализируя характер распределений амплитуд пульсаций $Pi3$ трех групп в HIS и MIR, можно на качественном уровне оценить влияние степени турбулентности плазмы в хвосте на тип поляризации пульсаций. Из анализа закономерностей перемежаемости пульсации $Pi3$ (рис. 7), следует, что для возбуждения левополяризованных пульсаций необходима более турбулизованная среда, чем для правополяризованных и пульсаций смешанной поляризации.

Традиционно считается, что из всех параметров межпланетной среды, ответственных за вероятность наблюдения магнитосферных суббурь, являются южная компонента ММП. Однако вопрос о проникновении в хвост магнитосферы межпланетного магнитного поля далеко не решен. Тем не менее, из полученных результатов следует, что ориентация вектора напряженности ММП в плоскости эклиптики определяет тип поляризации пульсаций $Pi3$ (рис. 5) и, следовательно, характеристики турбулентности в области пересоединения. На вопрос о том, с какими именно структурами в хвосте магнитосферы можно связать генерацию пульсаций $Pi3$, по всей видимости, однозначного ответа пока нет. Можно лишь предположить, что характерные длительности временных задержек между началом пульсаций $Pi3$ и моментом начала суббурь (Δt) соответствуют

времени формирования плазмоида в хвосте магнитосферы [Зеленый и др., 2016].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования показано, что для пульсаций $Pi3$, наблюдаемых в HIS и MIR, характерны правая, левая и смешанная поляризация (R -, L - и $R\&L$ -типы). Независимо от типа поляризации пульсации $Pi3$ наблюдались преимущественно в ночном секторе магнитосферы на заключительной стадии взрывной фазы суббури. Длительность временной задержки между моментом начала суббурь и появлением пульсаций $Pi3$ существенно зависит от их типа поляризации. В HIS обнаружена смена типа поляризации пульсаций $Pi3$ вблизи полуночного меридиана, в MIR пульсации $Pi3$ наблюдаются преимущественно в предполуночном секторе независимо от типа поляризации. В HIS и MIR не выявлено зависимости основных характеристик (амплитуды, частоты, эллиптичности и угла наклона главной оси эллипса поляризации) пульсаций $Pi3 R$ -, L - и $R\&L$ -типов от локального времени. Показано, что количественные характеристики плазмы солнечного ветра и ММП и интенсивность суббурь во время возбуждения пульсаций $Pi3$ разных типов поляризации в HIS и MIR практически идентичны. В HIS пульсации $Pi3 R$ - и $R\&L$ -типов наблюдаются преимущественно во время медленных течений солнечного ветра, а L -типа в период высокоскоростных потоков из корональных дыр. В MIR пульсации $Pi3$ трех типов поляризации наблюдаются преимущественно во время высокоскоростных потоков солнечного ветра. Показано, что мелкомасштабные замкнутые структуры магнитного поля в потоке медленного и быстрого течений солнечного ветра определяют тип поляризации пульсаций $Pi3$. Установлено, что возбуждение пульсаций $Pi3 R$ -, L - и $R\&L$ -типов происходит при разной степени плазменной турбулентности в хвосте магнитосферы.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Мирового центра данных по солнечно-земной физике (Москва) за предоставленную возможность использования геомагнитных данных обсерваторий о. Хейса и Мирный, создателям базы данных OMNI 2 (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) за возможность использования параметров солнечного ветра, ММП и данных Kp -, AE -, AL - и Dst -индексов, авторам “Каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2002 гг.” (ИКИ РАН, Москва) за возможность пользоваться этими данными.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по теме “Влияние космических факторов на развитие экстремальных процессов в магнитосфере Земли” госзадание № 0144-2014-00116.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н.* Иррегулярные $Pi3$ пульсации и их связь с потоками заряженных частиц в магнитосфере и ионосфере // “Physics of Auroral Phenomena” Proc. XXXVIII Annual Seminar, Kola Science Centre, Russian Academy of Science Apatity. P. 71–74. 2015.
- *Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г.* Разные типы потоков солнечного ветра и суббури в высоких широтах // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 59. № 1. С. 3–9. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S001679401901005X>
- *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- *Зелёный Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю.* Тонкие токовые слои: от работ Гинзбурга – Сыроватского до наших дней // УФН. Т. 186. № 11. С. 1153–1188. 2016.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2016.09.037923>
- *Клайн Б.И., Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю.* Переменяемость в волновых процессах // Физика Земли. № 10. С. 25–34. 2008.
- *Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли Ж., Биттерли М.* Длиннопериодные ($T = 8–10$ мин) геомагнитные пульсации в высоких широтах // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 38. № 4. С. 38–48. 1998.
- *Клейменова Н.Г., Антонова Е.Е., Козырева О.В., Малышева Л.М., Корнилова Т.А., Корнилов И.А.* Волновая структура магнитных суббурь в полярных широтах // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 785–793. 2012.
- *Козырева О.В., Мягкова И.Н., Антонова Е.Е., Клейменова Н.Г.* Высыпания энергичных электронов и геомагнитные пульсации $Pi3$ в полярных широтах // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 49. № 6. С. 777–785. 2009.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Влияние геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) на закономерности переменяемости геомагнитных пульсаций $Pi2$ // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 3. С. 11–20. 2015.
<https://doi.org/10.12737/11551>
- *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.* Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 335 с.
- *Нусинов А.А.* Влияние плазменного слоя на собственные колебания хвоста магнитосферы // Космич. исслед. № 9. С. 615–617. 1971.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 271 с.
- *Распопов О.М., Черноус С.А., Киселев Б.В.* Высокоширотные пульсации геомагнитного поля и их использование для диагностики параметров магнитосферы // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 11. № 4. С. 669–673. 1971.
- *Han D.-S., Yang H.-G., Chen Z.-T., Araki T., Dunlop M.W., Nosé M., Iyemori T., Li Q., Gao Y.-F., Yumoto K.* Coupling of perturbations in the solar wind density to global $Pi3$ pulsations: A case study // J. Geophys. Res. V. 112. A05217. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011675>
- *Hsu T.-S., McPherron R.L.* A statistical study of the relation of $Pi2$ and plasma flows in the tail // J. Geophys. Res. V. 112. A05209. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011782>
- *Kennel C. F., Buti B., Hada T., Pellat R.* Nonlinear, dispersive, elliptically polarized Alfvén waves // Physics of Fluids (1958–1988). V. 31. P. 1949. 1988.
<https://doi.org/10.1063/1.866642>
- *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // J. Geophys. Res. V. 110. A02104. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
- *Klein L.W., Burlaga L.F.* Interplanetary magnetic clouds at 1AU // J. Geophys. Res. V. 87. P. 613–624. 1982.
<https://doi.org/10.1029/JA087iA02p00613>
- *Kodera K., Gendrin R., Villedary C.* Complex representation of a polarized signal and its application to the analysis of ULF waves // J. Geophys. Res. V. 82. № 7. P. 1245–1255. 1977.
<https://doi.org/10.1029/JA082i007p01245>
- *Lazarian A., Vishniac E.T.* Reconnection in a Weakly Stochastic Field // The Astrophysical J. V. 517. № 2. P. 700–718. 1999.
<https://doi.org/10.1086/307233>
- *Matsuoka H., Takahashi K., Yumoto K., Anderson B.J., Sibeck D.G.* Observation and modeling of compressional $Pi3$ magnetic pulsations // J. Geophys. Res. V. 100. № A7. P. 12103–12115. 1995.
<https://doi.org/10.1029/94JA03368>
- *Marubashi K.* Interplanetary magnetic flux ropes observed by the Pioneer Venus Orbiter // Adv. Space Res. V. 11. P. (1)57–(1)60. 1991.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(91\)90090-7](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90090-7)
- *Nagano H., Suzuki A., Kim J.S.* $Pi3$ magnetic pulsations associated with substorms // Space Sci. V. 29. № 5. P. 529–553. 1981.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(81\)90067-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90067-2)
- *Olson J.* $Pi2$ pulsations and substorm onsets: A review // J. Geophys. Res. V. 104. P. 17499–17520. 1999.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900086>
- *Saito T.* Geomagnetic pulsations // Space Sci. Rev. V. 10. P. 319–412. 1969.
<https://doi.org/10.1007/BF00203620>

- *Saito T.* Examination of the models for the substorm-associated magnetic pulsation Ps 6. The Science Reports of the Tohoku University. Ser. 5. Geophysics. V. 22. P. 35–59. 1974.
- *Saito T.* Long period irregular magnetic pulsations Pi3 // Space Sci. Rev. V. 21. P. 427–467. 1978.
<https://doi.org/10.1007/BF00173068>
- *Saito T., Yumoto K.* Comparison of the two-snake model with the observed polarization of the substorm-associated magnetic pulsation Ps6 // J. Geomag. Geoelectr. V. 30. P. 39–54. 1978.
<https://doi.org/10.5636/jgg.30.39>
- *Sarries E.T., Krimigis S.* Evidence for solar magnetic loops beyond 1 AU // Geophys. Res. Lett. V. 9. P. 167–170. 1982.
<https://doi.org/10.1029/GL009i002p00167>
- *Suzuki A., Nagano H., Kim J.S., Sugiura M.* A statistical study on characteristics of high latitude Pi3 pulsations // J. Geophys. Res. V. 86. № A3. P. 1345–11354. 1981.
<https://doi.org/10.1029/JA086iA03p01345>
- *Yagova N.V., Pilipenko V.A., Lanzerotti L.J., Engebretson M.J., Rodger A.S., Lepidi S., Papitashvili V.O.* Two-dimensional structure of long-period pulsations at polar latitudes in Antarctica // J. Geophys. Res. V. 109. A03222. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010166>