

УДК 550.385.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ $Pc1$

© 2023 г. Б. И. Клайн¹, *, Н. А. Куражковская¹, **

¹Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН (ГО “Борок” ИФЗ РАН), пос. Борок (Ярославская обл.), Россия

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

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

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

После доработки 09.09.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Приведены результаты исследования пространственно-временных особенностей и межпланетных условий возбуждения структурированных геомагнитных пульсаций диапазона $Pc1$ (“жемчужины”). Для анализа использованы одновременные динамические спектры ультранизкочастотных колебаний в диапазоне частот 0.2–5.0 Гц, полученные по цифровым данным с высоким разрешением синхронных наблюдений на двух среднеширотных обсерваториях Борок (ВОХ, $\Phi' = 53.6^\circ$; $\Lambda' = 114.4^\circ$; $L = 2.8$) и Монды (MND, $\Phi' = 47^\circ$; $\Lambda' = 174^\circ$; $L = 2.1$) за период с 1996 по 2001 г. За анализируемый период на двух обсерваториях отобрано 108 когерентных серий жемчужин. Обнаружено, что серии пульсаций $Pc1$ наблюдались в обсерватории Борок по отношению к обсерватории Монды одновременно (19% случаев), с запаздыванием (54% случаев) и с опережением (27% случаев). Показано, что временные интервалы эффектов запаздывания и опережения начала жемчужин в ВОХ по отношению к MND преимущественно составляли 10 и 20 мин соответственно. Выявлены существенные различия в суточной вариации числа случаев $Pc1$ и геофизических условиях, при которых серии $Pc1$ возбуждаются одновременно, с запаздыванием или опережением в ВОХ по отношению к MND. Обнаруженные эффекты западного и восточного дрейфа серий $Pc1$ могут быть обусловлены положением источника колебаний относительно плазмопаузы в зависимости от межпланетных условий.

DOI: 10.31857/S0016794022600429, EDN: ACUSRZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные пульсации $Pc1$ в диапазоне частот 0.2–5.0 Гц представляют собой электромагнитные ионно-циклотронные (Electromagnetic Ion Cyclotron – EMIC) волны, наблюдаемые на Земле. Согласно современным представлениям пульсации $Pc1$ в виде волновых пакетов ионно-циклотронных волн самовозбуждаются в экваториальной области магнитосферы, распространяются вдоль геомагнитных силовых линий и через ионосферу проникают к земной поверхности [Гульельми и Троицкая, 1973; Mazur and Potarov, 1983].

Существует несколько разновидностей пульсаций $Pc1$, среди которых широко известны структурированные колебания, получившие название “жемчужины” (pearl necklace) [Sucksdorff, 1936]. Сразу необходимо отметить, что структурированные геомагнитные пульсации $Pc1$ по своим свойствам отличаются от неструктурированных. Причем различия структурированных и неструктурированных пульсаций $Pc1$ проявляются в широком спектре свойств пульсаций, например, в количестве наблюдаемых случаев, в среднем

диапазоне частот, в зависимости вероятности наблюдения $Pc1$ от локального времени, в различном влиянии магнитных бурь на суточную активность и частотный состав $Pc1$ [Kangas et al., 1998; Kerttula et al., 2001], в пространственном поведении пульсаций [Usanova et al., 2008; Пархомов и др., 2013]. Нас будут интересовать именно структурированные пульсации – жемчужины. Здесь и далее для краткости будем употреблять термин пульсации $Pc1$, имея в виду жемчужины.

Остановимся кратко на известных основных свойствах пульсаций $Pc1$. На магнитограммах жемчужины выглядят в виде последовательности волновых пакетов с характерной модуляцией амплитуды и напоминают жемчужное ожерелье [Гульельми и Троицкая, 1973]. Динамические спектры жемчужин разнообразны по форме и имеют специфическую структуру, состоящую из отдельных элементов [Feuquin et al., 2000; Фейгин и др., 2009]. Главной морфологической особенностью пульсаций $Pc1$ является их дискретность, период повторения всплесков в среднем составляет ~1–4 мин. Следует отметить, что $Pc1$ наблю-

даются спорадически. Их продолжительность может составлять от 30 мин до нескольких часов. Жемчужины могут наблюдаться как глобально в широком диапазоне геомагнитных широт и долгот, так и локально [Пудовкин и др., 1976].

Экспериментальному и теоретическому исследованию морфологии пульсаций $Pc1$ и механизмов их возбуждения посвящены монографии и обзоры, например, [Гульельми и Троицкая, 1973; Пудовкин и др., 1976; Kangas et al., 1998; Demekhov, 2007; Гульельми и Потапов, 2021]. Основные закономерности $Pc1$ по наземным и спутниковым наблюдениям отражены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях. Назовем лишь некоторые из них. Так, например, в работах [Fraser, 1975; Feygin et al., 2000; Nomura et al., 2011; Фейгин и др., 2022] исследовались спектрально-временные и поляризационные характеристики пульсаций $Pc1$. Пространственно-временное распространение $Pc1$ анализировалось в работах [Campbell and Thornberry, 1972; Varansky et al., 1981; Usanova et al., 2008; Пархомов и др., 2013]. В ряде работ [Матвеева и др., 1972; Матвеева, 1987; Kerttula et al., 2001; Гульельми и др., 2005; Матвеева и Щепетнов, 2006] исследовано влияние геомагнитных бурь, солнечной активности и параметров солнечного ветра на возбуждение пульсаций $Pc1$ и их циклическую вариацию. Связь пульсаций $Pc1$ с другими волновыми процессами (например, с гигантскими пульсациями — Pg , с высокоширотными магнитными импульсами — $MIEs$, с длиннопериодными пульсациями — $Pc5$, с ионосферными альвеновскими резонансами) рассмотрена в публикациях [Kurazhkovskaya et al., 2004, 2007; Loto'aniu et al., 2009; Довбня и др., 2019].

Несмотря на то, что пульсации $Pc1$ исследуются достаточно интенсивно с середины прошлого века и интерес к ним не угасает до настоящего времени, некоторые аспекты изучения пульсаций $Pc1$ продолжают оставаться недостаточно исследованными. Это относится к проблеме пространственно-временного распространения жемчужин. Считается, что жемчужины распространяются горизонтально вдоль земной поверхности от источника на большие расстояния со скоростью $\sim 700\text{--}900$ км/с [Гульельми и Троицкая, 1973; Kangas et al., 1998]. Эта скорость совпадает с оценками скорости магнитозвуковых волн в ионосферном волноводе. Если исходить из концепции распространения жемчужин по ионосферному волноводу, то начало серий $Pc1$ на разных геомагнитных широтах и долготах должны практически совпадать. Однако спутниковые и наземные данные свидетельствуют о том, что не всегда пульсации $Pc1$ регистрируются одновременно на разнесенных по широте и долготе точках наблюдений. Например, в работе [Пархомов и др., 2013] по данным наземных обсерваторий, отстоящих одна от

другой по долготе на $\sim 40^\circ$ обнаружено, что начало возбуждения неструктурированных пульсаций $Pc1$ запаздывает к западу и востоку от срединной обсерватории. Однако эффект западного и восточного дрейфа источника пульсаций $Pc1$ в рамках работы [Пархомов и др., 2013] обсуждается на примере всего одного события наблюдения неструктурированных $Pc1$. Возникает вопрос, обладают ли таким свойством структурированные пульсации $Pc1$? Предварительные исследования [Довбня и др., 2021] жемчужин по данным двух среднеширотных обсерваторий Борок и Монды, разнесенных по геомагнитной долготе на $\sim 60^\circ$ и широте на $\sim 7^\circ$ показало, что имеет место эффект запаздывания или опережения начала когерентных серий структурированных пульсаций $Pc1$ в обс. Борок по отношению к обс. Монды. Представляется целесообразным на большем статистическом материале более подробно исследовать обнаруженные закономерности пространственно-временного поведения структурированных пульсаций $Pc1$, оценить временные интервалы запаздывания или опережения серий $Pc1$, провести анализ геофизической обстановки, на фоне которой наблюдаются данные эффекты.

Целью данной работы является детальное исследование пространственно-временных особенностей и межпланетных условий возбуждения среднеширотных структурированных геомагнитных пульсаций диапазона $Pc1$ (жемчужины) по данным синхронных наблюдений УНЧ-вариаций на разнесенных по долготе и широте геофизических обсерваториях.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Анализ ультранизкочастотных геомагнитных пульсаций в диапазоне частот 0.2–5 Гц выполнялся по цифровым данным (с разрешением 0.1 с) регистрации магнитного поля на двух среднеширотных обсерваториях: Геофизической обсерватории Борок Института физики Земли РАН (ВОХ, исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = 53.6^\circ$; $\Lambda' = 114.4^\circ$; $L = 2.8$) и обс. Монды, расположенной на территории Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (MND, исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = 47^\circ$; $\Lambda' = 174^\circ$; $L = 2.1$) за период с 1996 по 2001 гг. На данных обсерваториях регистрация магнитного поля осуществлялась идентичными высокочувствительными индукционными магнитометрами ИНТ-1. Амплитудно-частотная характеристика приборов позволяла анализировать колебания с частотой до 10 Гц. Привязка ко времени выполнялась с помощью службы GPS. По исходным данным выполнялся спектрально-временной анализ, в результате которого получали динамические спектры колеба-

ний $Pc1$ (спектрограммы) в координатах частота – время. Далее полученные динамические спектры анализировались визуально. За исследуемый период выбирались дни, в которые жемчужины наблюдались сразу на двух обсерваториях. Всего было отобрано 108 случаев синхронных наблюдений пульсаций $Pc1$ в BOX и MND.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Спектрально-временной анализ серий пульсаций $Pc1$, наблюдаемых в обсерваториях Монды и Борка

Детальное сопоставление одновременных динамических спектров серий пульсаций $Pc1$, наблюдаемых в обсерваториях Монды и Борка, показало, что их спектры были, в основном, идентичны по внешнему виду, имели примерно одинаковую центральную частоту и продолжительность, а также подобный наклон структурных элементов динамических спектров. Вместе с тем было обнаружено, что жемчужины на двух обсерваториях, разнесенных на $\sim 60^\circ$ по долготе и $\sim 7^\circ$ по широте, наблюдались не всегда одновременно. Имели место случаи запаздывания или опережения начала серий $Pc1$ в obs. Борка по отношению к obs. Монды. Все анализируемые случаи наблюдения $Pc1$ в BOX и MND были условно разделены на три группы в соответствии со временем начала колебаний: 1) серии $Pc1$, наблюдаемые одновременно в BOX и MND (20 случаев); 2) серии $Pc1$, наблюдаемые с запаздыванием в BOX по сравнению с MND (58 случаев); 3) серии $Pc1$, наблюдаемые с опережением в BOX по сравнению с MND (30 случаев). Поскольку пульсации $Pc1$ второй группы в MND возникают раньше, чем в BOX, мы будем их отождествлять с дрейфом к западу и этот эффект условно назовем западным дрейфом $Pc1$. По аналогии события $Pc1$, относящиеся к третьей группе, когда в BOX возбуждение серий начинается раньше, чем в MND, отождествим с дрейфом на восток, и соответственно назовем восточным дрейфом $Pc1$. В дальнейшем будем использовать данную терминологию.

На рис. 1 приведены типичные примеры случаев наблюдения жемчужин в BOX и MND, относящихся к каждой из выше перечисленных групп. При общем сходстве серий жемчужин, наблюдаемых на двух обсерваториях, четко виден эффект одновременности, запаздывания или опережения начала серий в BOX по сравнению с MND. Так, для события, зарегистрированного 01.12.1999 г., характерно наблюдение начала серий $Pc1$ одновременно на двух обсерваториях (рис. 1а). Колебания в BOX и MND наблюдались с близкой амплитудой и одинаковыми динамическими спектрами. В случае события, наблюдаемого 30.11.1997 г., серии $Pc1$ регистрируются на обеих обсерваториях, но в obs.

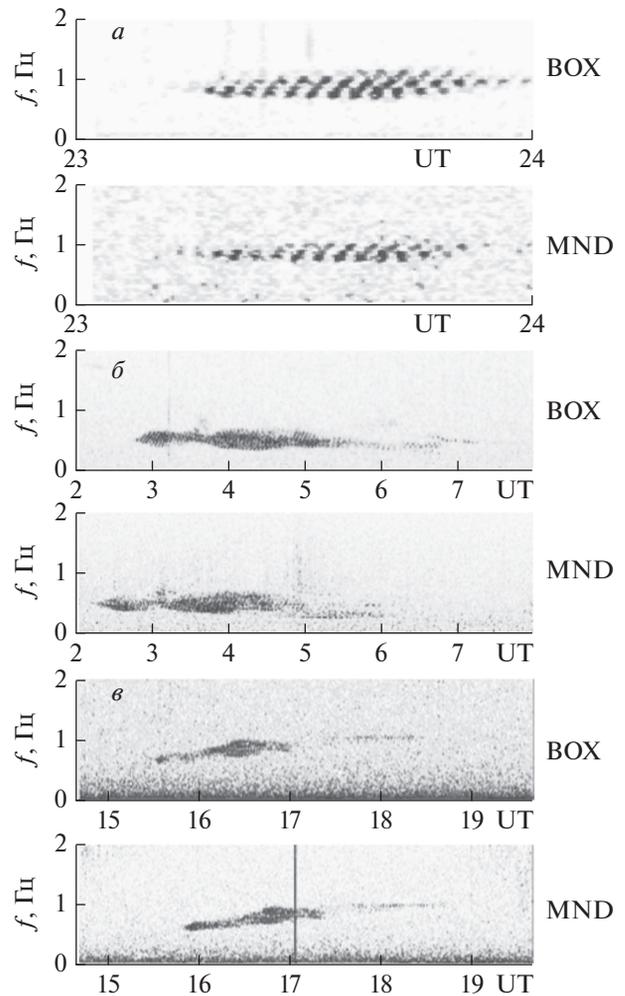


Рис. 1. Типичные примеры динамических спектров: (а) – одновременного появления серий $Pc1$ в BOX и MND 01.12.1999 г.; (б) – запаздывания начала серий $Pc1$ в BOX по отношению к MND 30.11.1997 г. (западный дрейф); (в) – опережения серий $Pc1$ в BOX по отношению к MND 03.01.2001 г. (восточный дрейф).

Борка, расположенной западнее obs. Монды, жемчужины появляются \sim на 23 мин позднее, чем в obs. Монды (рис. 1б). Следует отметить, что иногда жемчужины имеют незначительные различия в интенсивности и тонкой структуре динамического спектра, как это видно на рис. 1б. Судя по внешнему облику динамического спектра пульсаций, зарегистрированных 03.01.2001 г., мы также наблюдаем одну и ту же серию $Pc1$ на двух обсерваториях с примерно одинаковой интенсивностью и продолжительностью, но в BOX жемчужины появляются на ~ 20 мин раньше, чем в MND (рис. 1в).

В некоторых случаях в обсерваториях Борка и Монды синхронно наблюдалась не одна последовательность жемчужин, а 2–3, но с гораздо меньшей продолжительностью (не более получаса), чем в примерах, приведенных на рис. 1. Для не-

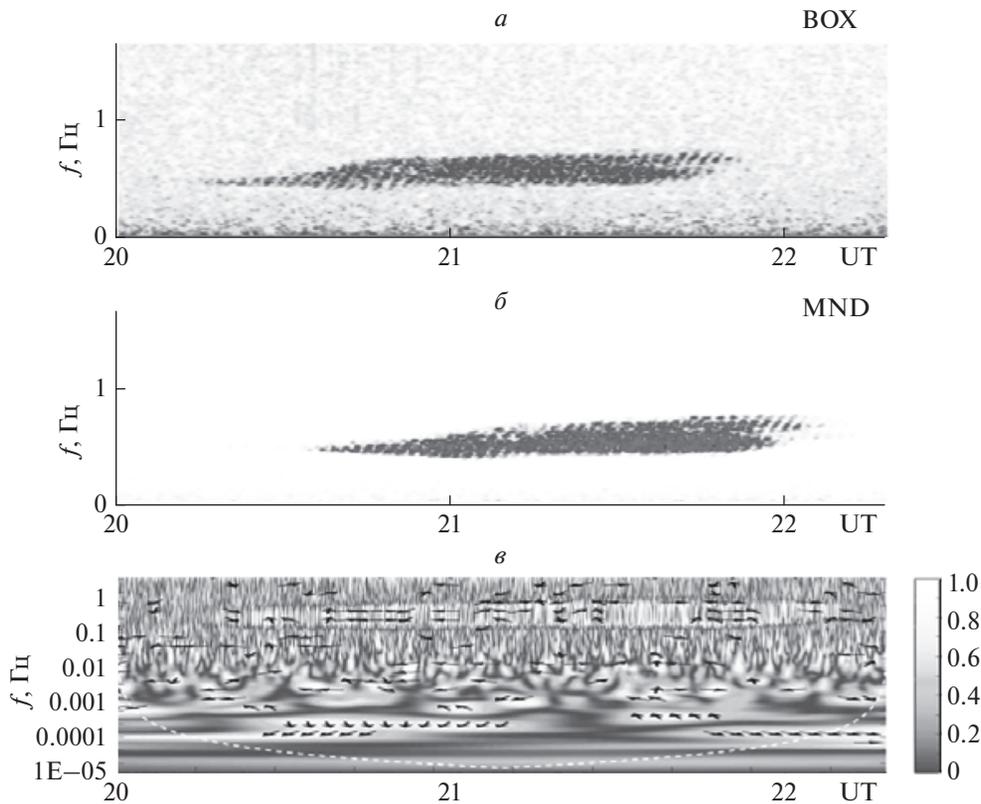


Рис. 2. Пример наблюдения жемчужин (а) – в BOX, (б) – в MND 15.12.2000 г., (в) – вейвлет-диаграмма когерентности серий Pc1.

скольких последовательностей серий Pc1 свойственны те же пространственно-временные закономерности (одновременность наблюдения, запаздывание и опережение в BOX по отношению к MND), что и для отдельных серий Pc1.

Для того, чтобы убедиться в том, что анализируемые на двух обсерваториях серии Pc1 имеют одинаковую природу, мы построили диаграммы когерентности, воспользовавшись программой, реализованной в системе MATLAB [MATLAB, 2018]. Оказалось, что независимо от того, к какой из трех групп относятся серии Pc1, они когерентны. В качестве примера на рис. 2а, 2б показано синхронное наблюдение серий Pc1 в BOX и MND 15.12.2000 г. В обеих обсерваториях колебания наблюдаются в одном и том же частотном диапазоне, имеют примерно одинаковую длительность и интенсивность. Однако четко видно опережение начала наблюдения серии Pc1 в BOX по отношению к MND с временным интервалом ~20 мин. Внизу (рис. 2в) представлена вейвлет-диаграмма их когерентности, построенная с учетом временного сдвига (20 мин) между началом жемчужин на двух обсерваториях. Видно, что максимальная когерентность двух сигналов достигается в интервале частот 0.1–1.0 Гц, т.е. в том же частотном диапазоне, в котором наблюдаются серии Pc1. Та-

ким образом, полученные диаграммы когерентности подтвердили визуально наблюдаемое подобие частот и неизменность с течением времени разности фаз серий Pc1 на двух обсерваториях. Следовательно, когерентность является характерной особенностью синхронно наблюдаемых жемчужин в BOX и MND.

3.2. Длительность временных интервалов между началом когерентных серий Pc1 в BOX и MND и суточная вариация числа событий Pc1, наблюдаемых одновременно, с западным и восточным дрейфом

Как видно из приведенных примеров (рис. 1, 2) между началом когерентных серий Pc1 в BOX и MND имеется некоторый временной интервал $\Delta t = t_{\text{BOX}} - t_{\text{MND}}$, величина которого $\Delta t = 0$ для событий первой группы, $\Delta t > 0$ для второй группы и $\Delta t < 0$ для третьей группы. Величина Δt оценивалась по началу наблюдаемых одинаковых структурных элементов одновременных спектрограмм для каждого случая наблюдения жемчужин в BOX и MND. Точность определения Δt составляла ± 1 мин. На рис. 3 представлено распределение длительности временных интервалов (Δt) между началом пульсаций Pc1 в BOX и MND для всех

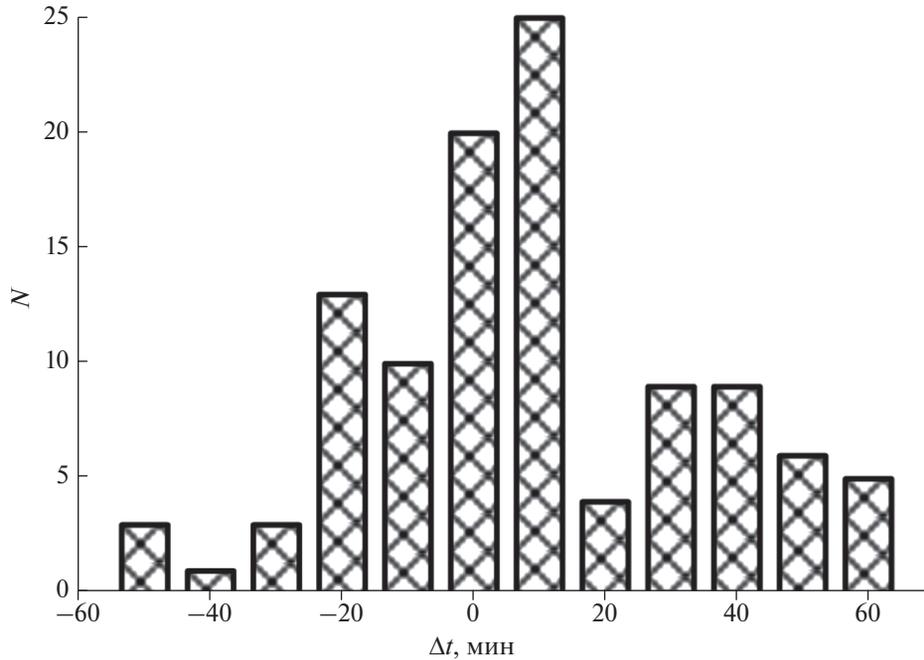


Рис. 3. Зависимость числа наблюдений серий $Pc1$ от временного интервала между началом пульсаций в VOX по отношению к MND.

анализируемых случаев. По вертикальной оси обозначено число случаев. По горизонтальной шкале размер одного деления составляет 10 мин. Величина $\Delta t = 0$ на оси абсцисс соответствует одновременным случаям наблюдений серий $Pc1$ в VOX и MND. Справа от нуля на горизонтальной оси – распределение временных интервалов, относящихся к западному дрейфу, слева от нуля – к восточному дрейфу. Величина запаздывания или опережения начала пульсаций в VOX относительно их наблюдения в MND лежит в интервале от двух до 60 мин. Наиболее вероятная продолжительность временных интервалов между началами серий $Pc1$ при западном дрейфе составляет ~ 10 мин, а при восточном дрейфе ~ 20 мин.

Необходимо отметить, что появление серий $Pc1$ каждой из трех групп отмечалось в различное местное время. На рис. 4 показана суточная вариация числа событий $Pc1$, наблюдаемых в VOX и MND, одновременно, с западным и восточным дрейфом. Для удобства сравнения число случаев $Pc1$ нормировано на их максимальное количество. Видно (рис. 4а, 4б), что серии $Pc1$ первой группы наблюдаются в VOX преимущественно в ранние утренние часы (02–05 MLT), а в MND в более позднее утреннее время (06–09 MLT). Наибольшая вероятность наблюдения жемчужин с западным и восточным дрейфом в VOX приходится на предполуночное время (22–23 MLT) и (23–24 MLT) соответственно, что не характерно для суточной вариации среднеширотных пульсаций $Pc1$. Как известно, возбуждение $Pc1$ на сред-

них широтах наблюдается, в основном, в ранние утренние часы. В MND серии $Pc1$ второй и третьей группы преимущественно регистрируются в утренние часы (04–05 MLT), что соответствует временному ходу частоты появления среднеширотных пульсаций $Pc1$. Таким образом, суточное распределение событий каждой группы существенно зависит от MLT.

3.3. Зависимость частоты появления серий $Pc1$, наблюдаемых в VOX и MND одновременно, с западным и восточным дрейфом от геомагнитной активности и межпланетных условий

Далее было выполнено исследование геофизических условий, при которых регистрировалось появление серий $Pc1$ каждой из выше перечисленных групп. Для анализа геомагнитной активности, на фоне которой наблюдались пульсации $Pc1$ в VOX и MND, использовался Kp -индекс, отражающий планетарную возмущенность. Величина Kp -индекса бралась, как принято в базе данных OMNI. На рис. 5 представлены гистограммы распределений числа случаев пульсаций $Pc1$ в зависимости от величины Kp -индекса для трех анализируемых групп. Для удобства сравнения число случаев $Pc1$ нормировано на их максимальное количество. Полученные распределения различаются как по диапазонам изменения Kp -индекса, так и по положению максимумов. Так, серии $Pc1$ в VOX и MND наблюдались одновременно при диапазоне Kp , изменяющемся от 0 до 30, а в доми-

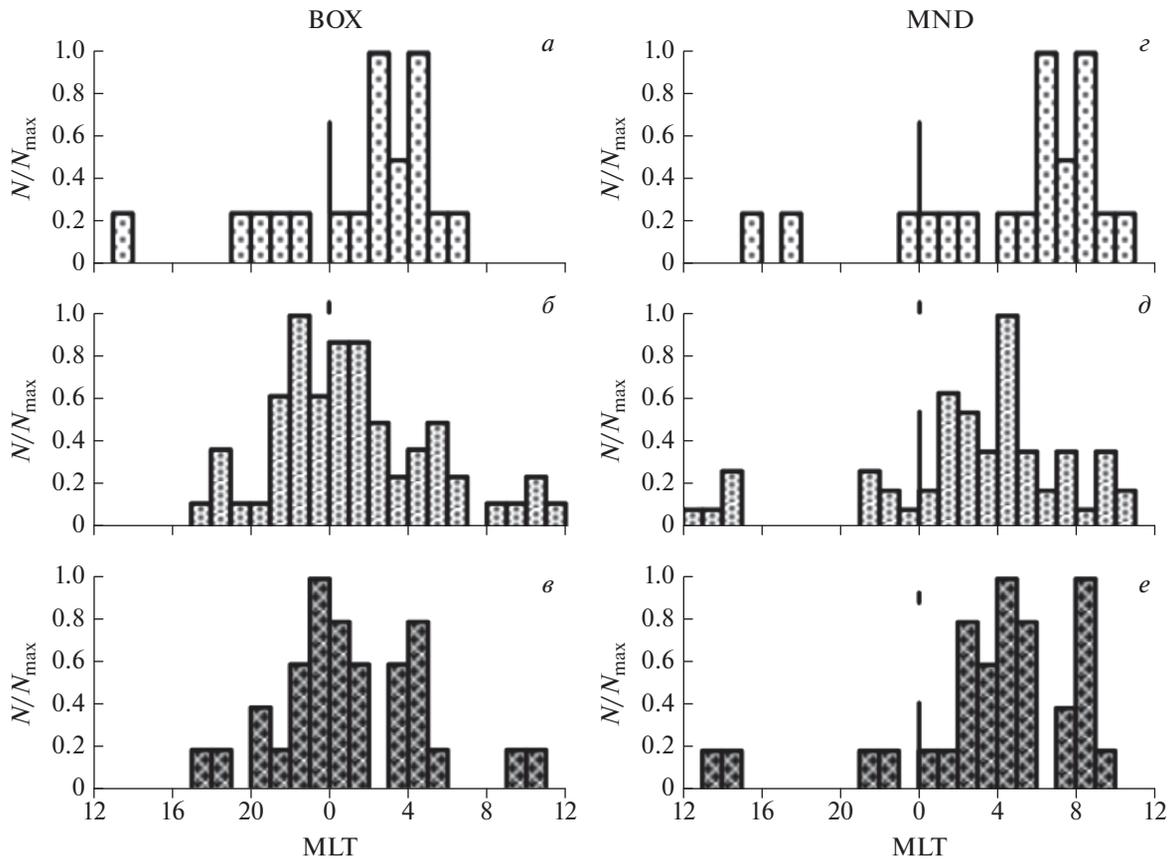


Рис. 4. Суточная вариация числа случаев *Pc1*, наблюдаемых в BOX и MND, (*a, z*) – одновременно; (*б, д*) – с западным дрейфом; (*в, е*) – с восточным дрейфом.

нирующем числе случаев при $Kp \sim 10-20$. Серии *Pc1*, начало которых запаздывало в BOX по сравнению с MND, наблюдались при более широком диапазоне изменения *Kp*-индекса (от 0 до 60), а максимум частоты наблюдения жемчужин приходился на $Kp \sim 20-30$. События третьей группы регистрировались при индексе *Kp*, изменяющемся от 0 до 40, а в большинстве случаев при $Kp \sim 0-10$. Таким образом, даже в условиях спокойной магнитосферы, которые являются типичными для наблюдения жемчужин, возбуждение серий *Pc1*, наблюдаемых в BOX и MND одновременно, с западным или восточным дрейфом, существенно различаются по уровню геомагнитной активности.

Чтобы исследовать состояние межпланетной среды, на фоне которой наблюдались когерентные серии *Pc1* в BOX и MND, рассматривались следующие параметры плазмы солнечного ветра и ММП: концентрация N , скорость V , динамическое давление солнечного ветра $P_{dyn} = \rho V^2$ (ρ – плотность плазмы), модуль напряженности B ; B_x -, B_y -, B_z -компоненты ММП. Кроме того, анализировалась ориентация вектора ММП в плоскости эклиптики, для характеристики которой ис-

пользовался угол θ_{xB} (угол между вектором ММП B и его радиальным направлением). Величина угла θ_{xB} находилась из выражения: $\theta_{xB} = \arccos(B_x/B)$, где $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ [Bier et al., 2014]. Параметры солнечного ветра и ММП брались в солнечно-эклиптической системе координат. Одноминутные данные вышеперечисленных параметров исследовались методом наложения эпох на временном интервале за 2 ч до и 2 ч после начала серий *Pc1* отдельно для каждой группы жемчужин. За реперную точку принимался момент начала серий *Pc1*.

На рисунке 6 представлены полученные результаты для случаев *a* – одновременного наблюдения; *б* – запаздывания; *в* – опережения серий *Pc1* в BOX по отношению к MND. Из рисунка 6 видно, что параметры плазмы солнечного ветра (N, V, P_{dyn}) для трех групп не подвержены каким-либо флуктуациям вблизи реперной точки и оставались относительно стабильными как до начала серий *Pc1*, так и после. Аналогичная тенденция поведения характерна для модуля ММП B . Поведение N, V, P_{dyn}, B качественно одинаково для событий трех групп. В месте с тем обращает на себя

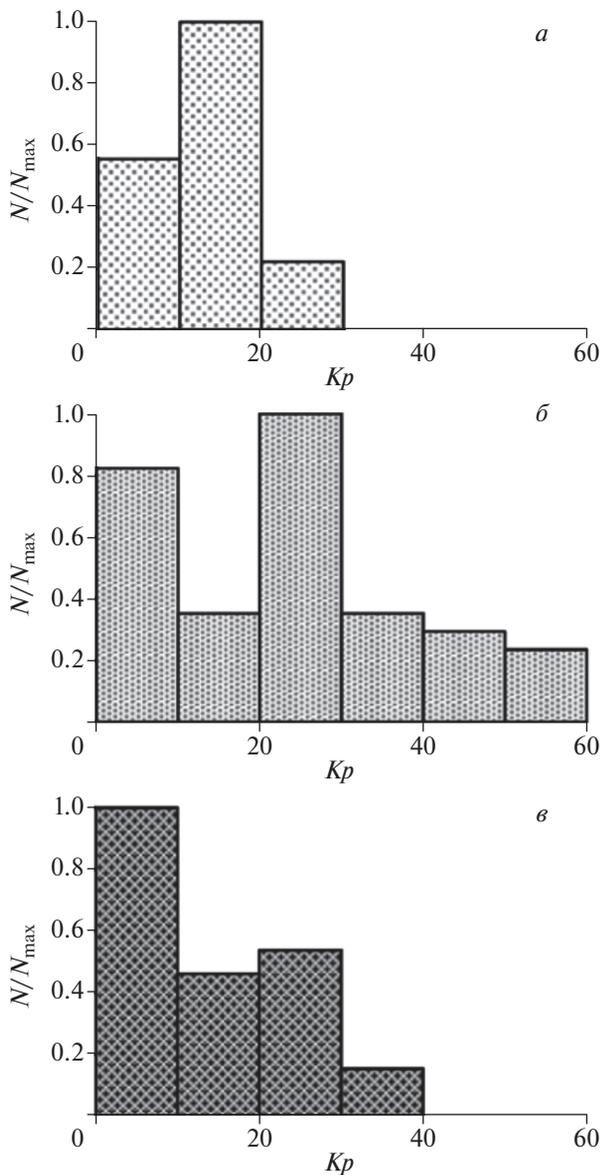


Рис. 5. Зависимость частоты наблюдения серий $Pc1$ от геомагнитной активности (Kp -индекса), регистрируемых в ВОХ и MND: (а) — одновременно; (б) — с западным дрейфом; (в) — с восточным дрейфом.

внимание тот факт, что серии $Pc1$ с западным дрейфом наблюдаются при более высоких значениях параметров N , V , P_{dyn} , B , чем серии, регистрируемые одновременно и с восточным дрейфом.

Динамика V_x -, V_y -, V_z -компонент значительно различается как по знаку, так и по величине. Например, события первой группы наблюдаются при $V_x < 0$, $V_y > 0$, $V_z < 0$, второй и третьей группы при $V_x > 0$, $V_y > 0$, $V_z > 0$. Еще одной отличительной особенностью поведения компонента ММП для событий трех групп является смена направления V_z -компоненты вблизи реперной точки с северного на южное и с южного на северное в слу-

чае одновременного наблюдения $Pc1$ и с восточным дрейфом соответственно. Для событий второй группы не характерно изменение направления V_z -компоненты вблизи начала серий. В данном случае V_z -компонента ММП сохраняла положительное направление как до начала серий $Pc1$, так и после.

Приведенные на рис. 6 вариации угла θ_{xB} ($\theta_{xB} = \arccos(V_x/B)$), отражающего поведение вектора напряженности B ММП в плоскости эклиптики, имеют характерные особенности для случаев наблюдения серий $Pc1$ трех групп. Так, когда жемчужины наблюдаются одновременно в ВОХ и MND, вектор B вблизи реперной точки начинает поворачиваться от 90° к $\sim 120^\circ$ – 150° , т.е. пульсации наблюдаются при радиальном направлении ММП (от Солнца). Если начало серий $Pc1$ в ВОХ по времени запаздывает по сравнению с MND, то такие события наблюдаются при $\theta_{xB} \sim 90^\circ$, и следовательно вектор B ММП перпендикулярен линии Солнце–Земля в плоскости эклиптики. События третьей группы, так же как и первой, после нулевой точки наблюдаются при радиальном направлении ММП ($\theta_{xB} \sim 0^\circ$ – 30°), но только при обратном направлении (от Солнца). Итак, и в магнитно-спокойное время условия в солнечном ветре оказывают сильное влияние на пространственно-временные свойства структурированных серий $Pc1$, которые проявляются в обнаруженных эффектах западного и восточного дрейфа.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что $Pc1$ возникают во внешнем радиационном поясе Земли вследствие развития ионно-циклотронной неустойчивости энергичных протонов и распространяются в магнитосфере вдоль геомагнитных силовых линий [Гульельми и Троицкая, 1973; Гульельми и Потапов, 2021]. Наиболее вероятной областью возбуждения геомагнитных пульсаций $Pc1$ является плазмопауза, вблизи которой может формироваться ионно-циклотронный резонатор для $Pc1$ [Dmitrienko and Mazur, 1985]. Действительно, некоторые наземные и спутниковые исследования, например, [Fraser et al., 1989; Erlandson and Anderson, 1996; Gou et al., 2020] показали тесную связь пульсаций $Pc1$ с положением плазмопаузы. В свою очередь, согласно спутниковым наблюдениям, положение плазмопаузы очень изменчиво и значительно зависит от условий в солнечном ветре, геомагнитной активности и MLT [Verbanac et al., 2015].

Наиболее типичным условием возбуждения серий $Pc1$, исследованных в данной работе, является слабая и умеренная возмущенность геомагнитного поля. Тем не менее, как следует из рис. 5, проанализированные три группы синхронных наблюдений структурированных пульсаций $Pc1$

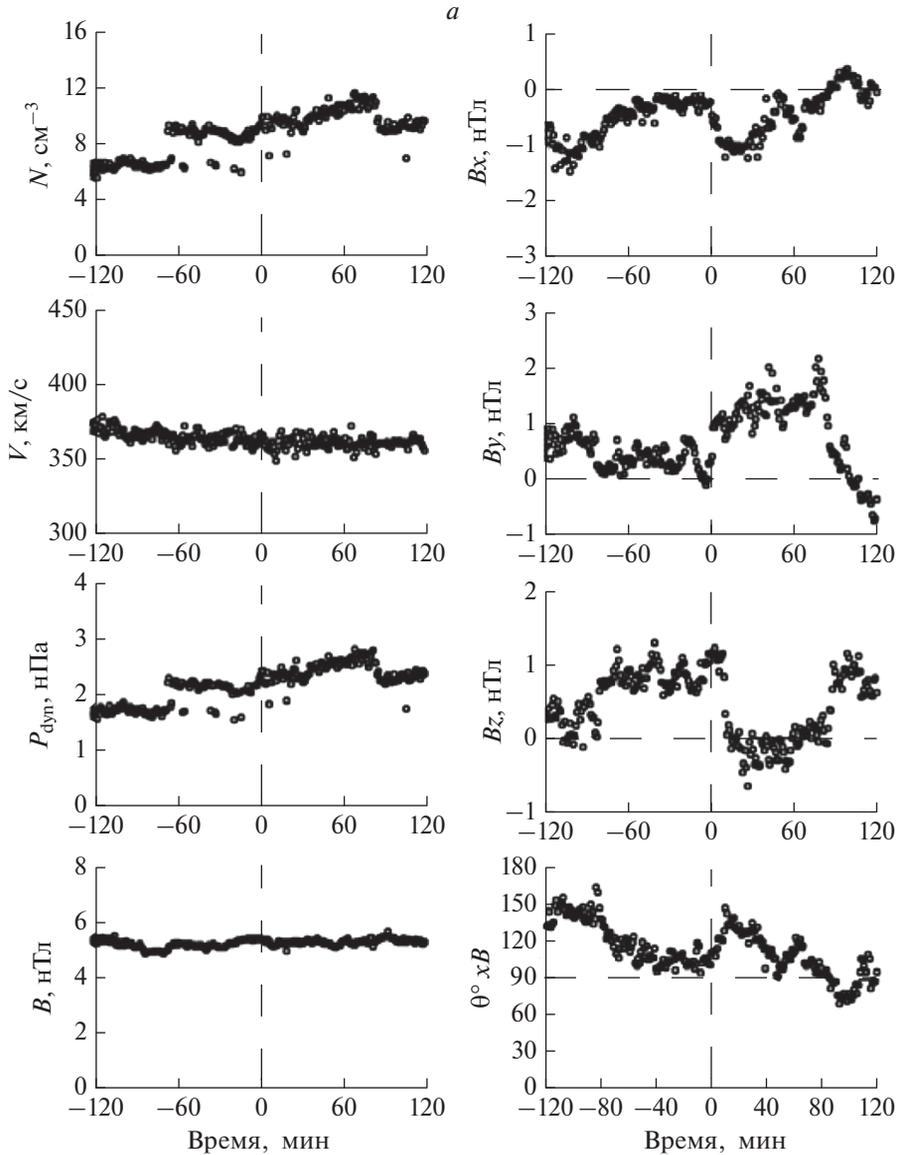


Рис. 6. Динамика параметров солнечного ветра и ММП, полученная методом наложения эпох для случаев начала (а) – одновременного наблюдения; (б) – запаздывания; (в) – опережения серий *Pc1* в ВОХ по отношению к MND.

возбуждаются при разном уровне геомагнитной активности. Последнее указывает на тот факт, что обсерватории Борок и Монды оказываются в разном положении относительно источника колебаний. При умеренных возмущениях ($Kp = 20-30$), по-видимому, источник колебаний локализован вблизи $L = 2.1$ (начало пульсаций *Pc1* в MND раньше, чем в ВОХ) и далее источник дрейфует на $L = 2.8$. В этом случае наблюдается западный дрейф пульсаций *Pc1*. В очень спокойных геомагнитных условиях ($Kp = 0-10$) плазмопауза находится на большем расстоянии от Земли и источник излучения *Pc1* может находиться первоначально вблизи $L = 2.8$ (начало пульсаций *Pc1* в ВОХ раньше, чем в MND) и затем сместиться на

$L = 2.1$. Такой сценарий характерен для восточного дрейфа *Pc1*. Иными словами, движение волнового источника к высоким или низким широтам, вероятно, связано с переходом плазмопаузы на верхние или нижние L -оболочки. Причем согласно Moldwin et al. [2002] изменчивость местоположения плазмопаузы в два раза больше при низкой величине Kp -индекса ($\sim 2-3$), чем при более высокой Kp ($\sim 4-5$). По-видимому, подобная сильная изменчивость положения плазмопаузы при слабой геомагнитной активности может оказаться существенным фактором, влияющим на наблюдаемые эффекты западного и восточного дрейфа *Pc1*.

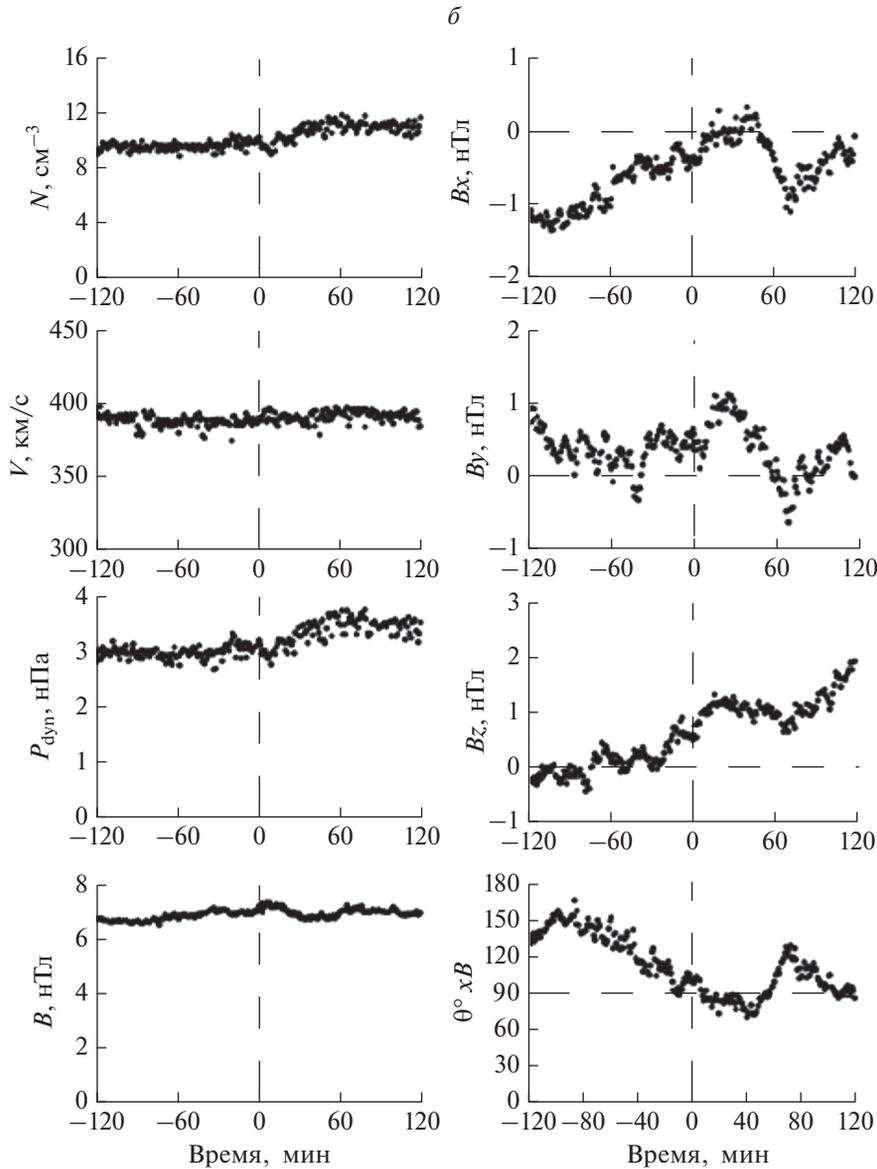


Рис. 6. Продолжение.

На наш взгляд временные сдвиги между началом серий $Pc1$ в ВОХ и MND (которые наиболее вероятны для западного и восточного дрейфа – 10 и 20 мин соответственно) могут быть обусловлены характерными временами реакции магнитосферы на изменения в ММП [Нишида, 1980] и, в частности, изменения положения плазмопаузы.

При величинах Kp -индекса, равных среднему значению для западного и восточного дрейфа ($Kp = 10–20$), пульсации $Pc1$ наблюдаются в двух обсерваториях одновременно, т.е. волновой источник занимает промежуточное положение между $L = 2.8$ и $L = 2.1$ (равноудален от ВОХ и MND). Можно предположить, что взаимное расположение плазмопаузы и ионно-циклотронного

резонатора, изменяющееся в соответствии с условиями в солнечном ветре, обеспечивает различные эффекты (одновременность, запаздывание или опережение) начала серий $Pc1$ в ВОХ по отношению в MND.

Другим фактором, влияющим на пространственно-временные закономерности пульсаций $Pc1$ может быть ориентация вектора напряженности ММП в плоскости эклиптики (рис. 6). Одновременные начала серий $Pc1$ контролируются преимущественным радиальным направлением вектора B ММП в плоскости эклиптики от Солнца ($\theta_{xB} \rightarrow 180^\circ$). Эффект запаздывания жемчужин в ВОХ по отношению к MND в доминирующем числе случаев наблюдается при направлении век-

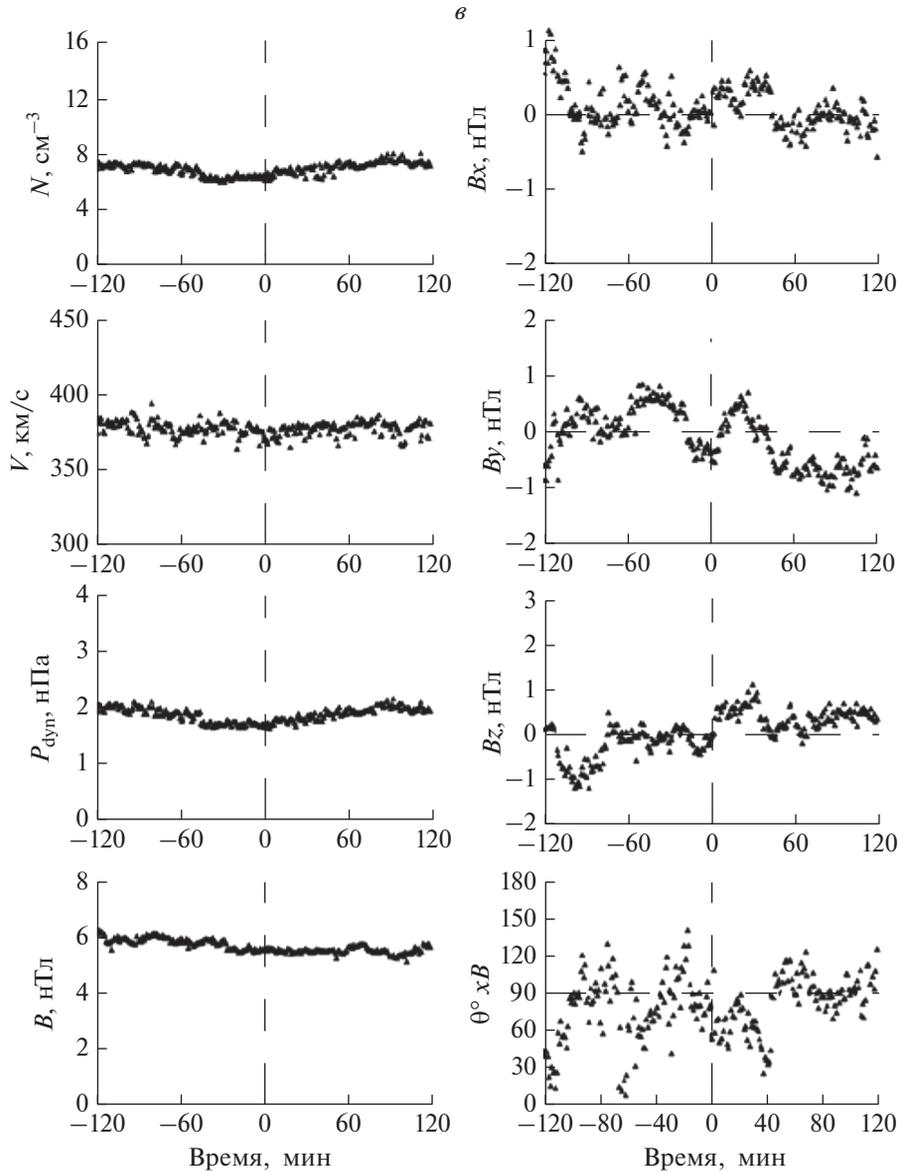


Рис. 6. Окончание.

тора B ММП, перпендикулярном линии Солнце–Земля ($\theta_{xB} \rightarrow 90^\circ$). Эффект опережения жемчужин в ВОХ по отношению к MND, главным образом, наблюдается при направлении B ММП к Солнцу ($\theta_{xB} \rightarrow 0^\circ$).

Кроме того, даже в спокойных условиях переориентация вертикальной компоненты ММП, приводящая к развитию процессов пересоединения межпланетного и геомагнитного полей, способствует поступлению протонов в радиационный пояс в экваториальной плоскости магнитосферы. Как видно из рис. 6, динамика B_z -компоненты ММП вблизи начала серий $Pc1$ существенно различается для событий трех групп, что также

может оказывать влияние на обнаруженные эффекты западного и восточного дрейфа $Pc1$.

Эффект одновременного начала наблюдений серий $Pc1$ на двух обсерваториях мог быть понят в рамках представления об ионосферном волноводе. Принято считать, что левополяризованные альвеновские волны (EMIC-волны), возбуждаясь в вершине магнитных силовых линий, достигают ионосферы и захватываются в горизонтальный ионосферный волновод. Распространяясь со скоростью $\sim 700\text{--}900$ км/с по ионосферному волноводу, эти волны преобразуются в правополяризованные магнитозвуковые волны, которые проникают от источника генерации практически мгновенно на большие расстояния. Это предпо-

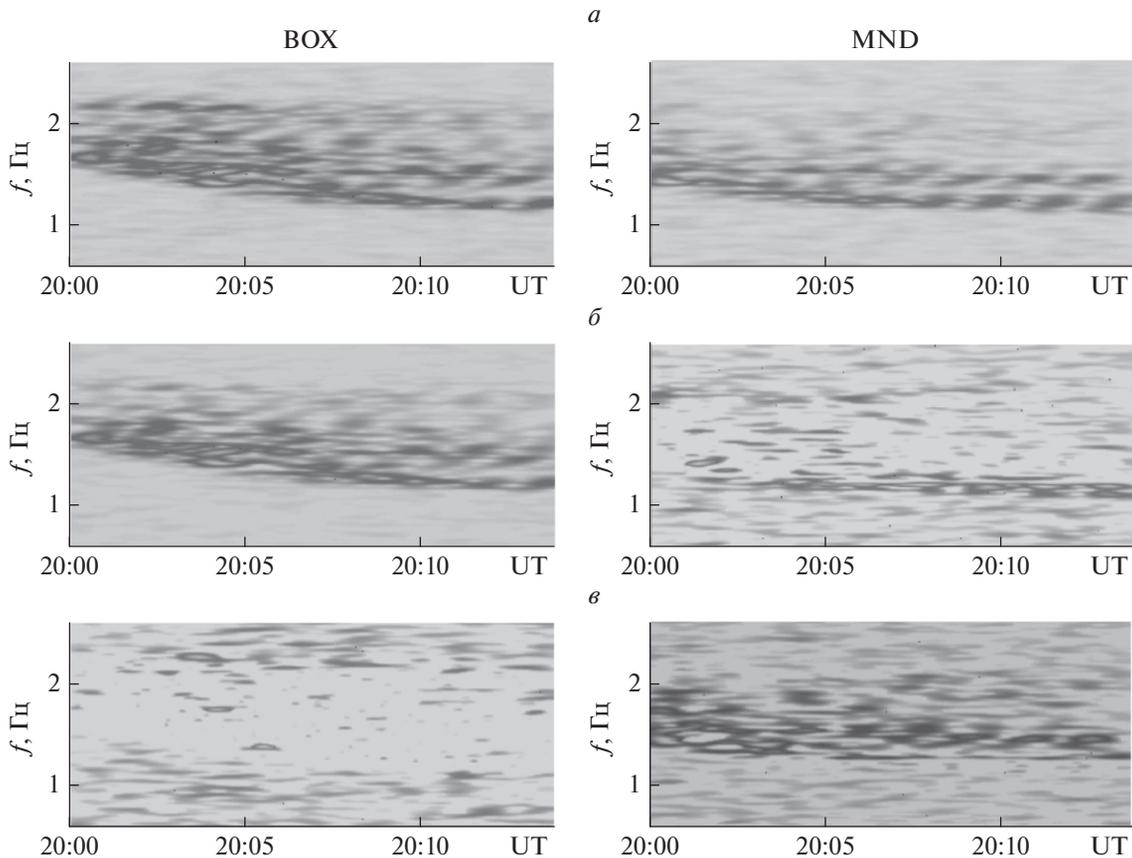


Рис. 7. Пример определения типа поляризации пульсаций $Pc1$, наблюдаемых одновременно в BOX и MND 24.02.1999 г.: (а) – полная спектральная плотность, (б) – спектральная плотность левополяризованной и (в) – правополяризованной моды исходного сигнала.

лагают одновременное начало наблюдения пульсаций $Pc1$ на земной поверхности в широком диапазоне геомагнитных широт и долгот. Причем вблизи источника генерации волны $Pc1$ должны быть левополяризованы, а на удалении от него – правополяризованы. Заметим, что когерентность сигналов (рис. 2), а также подобие динамических спектров пульсаций $Pc1$, наблюдаемых на двух обсерваториях, явно указывает на их происхождение из одного источника. Исходя из вышесказанного, в обсерваториях Борок и Монды должны были наблюдаться либо правополяризованные колебания $Pc1$ (если волновой источник расположен вне данных L -оболочек), либо хотя бы на одной из них – левополяризованные или правополяризованные (если источник генерации расположен вблизи $L = 2.8$ или $L = 2.1$).

Исходя из вышесказанного, мы выполнили анализ типа поляризации пульсаций $Pc1$, наблюдаемых в двух обсерваториях. Тип поляризации $Pc1$ определялся с помощью спектрально-временного анализа, основанного на методе быстрого преобразования Фурье [Kodera et al., 1977]. Для этого в плоскости $H-D$ компонент для каждого

случая наблюдений $Pc1$ в BOX и в MND строилась полная спектральная плотность, а также спектральная плотность правополяризованной и левополяризованной моды исходного сигнала. Колебания $Pc1$ считались правополяризованными, если доминировала спектральная плотность правополяризованной моды и левополяризованными, если доминировала спектральная плотность левополяризованной моды. Анализ поляризации пульсаций $Pc1$ показал, что в большинстве случаев как в BOX (58%), так и в MND (73%) наблюдалась смешанная поляризация. Колебания были левополяризованы в 32% случаев в BOX и в 8% случаев в MND и правополяризованы в 10% и 19% случаев соответственно в BOX и в MND.

На рисунке 7 в качестве примера дано определение типа поляризации для случая одновременного наблюдения пульсаций $Pc1$ в BOX и в MND 24.02.1999 г., на котором представлена полная спектральная плотность, спектральная плотность левополяризованной и правополяризованной моды соответственно. Из рис. 7 видно, что в BOX доминирует спектральная плотность левополяризованной моды и, следовательно, серия pulsa-

ций $Pc1$ левополяризована. В MND спектральная плотность левополяризованной и правополяризованной моды равнозначны, что соответствует смешанной поляризации пульсаций $Pc1$. Тот факт, что на двух обсерваториях, разнесенных по широте и долготе, одновременно наблюдается левая и смешанная поляризация пульсаций $Pc1$, противоречит существующему представлению о волноводном распространении ЕМЭС-волн. Более того, концепция волноводного распространения не позволяет объяснить не только одновременность наблюдения начала серий пульсаций, но и эффекты их западного и восточного дрейфа.

Исходя из полученных экспериментальных данных, скорее всего, обнаруженные особенности пространственно-временного распространения структурированных пульсаций $Pc1$ определяются взаимным перемещением источника колебаний и плазмопаузы при изменении условий в ММП.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сопоставления динамических спектров синхронных наблюдений УНЧ-колебаний в диапазоне частот 0.2–5.0 Гц на двух разнесенных по геомагнитной долготе (\sim на 60°) и широте (\sim на 7°) обсерваторий обнаружен эффект запаздывания или опережения начала структурированных серий $Pc1$ в обс. Борок по отношению к обс. Монды. Выявлено, что динамические спектры серий $Pc1$ в ВОХ и MND были идентичны по внешнему виду, имели примерно одинаковую центральную частоту и продолжительность, а также подобный наклон структурных элементов. Показано, что временные сдвиги эффектов запаздывания или опережения начала жемчужин в ВОХ по отношению к MND преимущественно составляли 10 и 20 мин соответственно. В 19% случаев время начала жемчужин на двух обсерваториях совпадало.

Установлено, что случаи одновременного начала жемчужин в ВОХ и MND наблюдаются при $Kp \sim 10$ –20 и контролируются преимущественным радиальным направлением вектора B ММП в плоскости эклиптики (характеризуемым величиной угла $\theta_{xB} = \arccos(Bx/B)$) от Солнца ($\theta_{xB} \rightarrow 180^\circ$). Эффект запаздывания жемчужин в ВОХ по отношению к MND в доминирующем числе случаев наблюдается при $Kp \sim 20$ –30 и направлении вектора B ММП, перпендикулярном линии Солнце–Земля ($\theta_{xB} \rightarrow 90^\circ$). Эффект опережения жемчужин в ВОХ по отношению к MND, главным образом, наблюдается при $Kp \sim 0$ –10 и направлении B ММП к Солнцу ($\theta_{xB} \rightarrow 0^\circ$).

Обнаруженные эффекты западного и восточного дрейфа серий $Pc1$ могут быть обусловлены положением источника колебаний относительно плазмопаузы в зависимости от межпланетных условий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим сотрудников Института солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск) за предоставление цифровых данных синхронной регистрации магнитного поля с высоким разрешением в обсерваториях Монды и Борок. Выражаем искреннюю благодарность А.С. Потапову за интерес к работе и полезные обсуждения полученных результатов, Б.В. Довбне – за помощь в обработке экспериментального материала. Авторы благодарны создателям базы данных OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) за возможность использования параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитных индексов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гутьельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 208 с. 1973.
- Гутьельми А., Кангас Й., Кюльтима Й., Лундин Р., Матвеева Э., Полюшкина Т.Н., Потапов А.С., Турунен Т., Цэгмед Б. Воздействие солнечного ветра на волновую активность магнитосферы в диапазоне $Pc1$ // Солнечно-земная физика. Вып. 8. С. 122–125. 2005.
- Гутьельми А.В., Потапов А.С. Частотно-модулированные ультранизкочастотные волны в околоземном космическом пространстве // УФН. Т. 21. № 5. С. 475–491. 2021.
<https://doi.org/10.3367/UFN.2020.06.038777>
- Довбня Б.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Динамика ионосферных альвеновских резонансов (ИАР) в конце 21 – 24 циклах солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 1. С. 39–49. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019010061>
- Довбня Б.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Долготные эффекты геомагнитных пульсаций $Pc1$. Шестнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”. Сборник тезисов. ИКИ РАН, Москва, 8–12 февраля 2021 г. С. 151. 2021.
- Матвеева Э.Т., Калишер А.Л., Довбня Б.В. Физические условия в магнитосфере и в межпланетном пространстве при возбуждении геомагнитных пульсаций типа $Pc1$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 12. № 6. С. 1125–1127. 1972.
- Матвеева Э.Т. Циклическая вариация активности геомагнитных пульсаций $Pc1$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 3. С. 455–458. 1987.
- Матвеева Э.Т., Щепетнов Р.В. Связь активности ионно-циклотронных волн в магнитосфере Земли с параметрами солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 44. С. 569–572. 2006.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 299 с. 1980.
- Пархомов В.А., Цэгмэд Б., Дмитриев А.В. О природе источников всплеска неструктурированных пульсаций $Pc1$ по одновременным наблюдениям на Земле и

- на геостационарной орбите // Солнечно-земная физика. Вып. 23. С. 75–83. 2013.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 271 с. 1976.
- Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Хабазин Ю.Г., Прикнер К. Нелинейный характер ионно-циклотронных волн ($Pc1$ пульсаций) с расширяющимся динамическим спектром // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С. 335–341. 2009.
- Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Мальшева Л.М., Хабазин Ю.Г., Громова Л.И., Райта Т. Поляризация геомагнитных пульсаций $Pc1$ как косвенный индикатор положения их источника // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 1. С. 88–96. 2022.
<https://doi.org/1031857/S0016794021060055>
- Baransky L., Golikov Yu., Feygin F., Harchenko I., Kangas J., Pikkarainen T. Role of the plasmopause and ionosphere in the generation and propagation of pearl pulsations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 43. № 9. P. 875–881. 1981.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90079-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90079-9)
- Bier E.A., Owusu N., Engebretson M.J., Posch J.L., Lesard M.R., Pilipenko V.A. Investigating the IMF cone angle control of $Pc3$ – 4 pulsations observed on the ground // J. Geophys. Res.–Space. V. 119. P. 1797–1813. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019637>
- Campbell W.H., Thornberry T.C. Propagation of $Pc1$ Hydromagnetic Waves across North America // J. Geophys. Res. V. 77. № 10. P. 1941–1950. 1972.
<https://doi.org/10.1029/JA077i10p01941>
- Demekhov A.G. Recent progress in understanding $Pc1$ pearl formation // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 1609–1622. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.01.014>
- Dmitrienko I.S., Mazur V.A. On waveguide propagation of Alfvén waves at the plasmopause // Planet. Space Sci. V. 33. P. 471–477. 1985.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(85\)90092-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90092-3)
- Erlandson R.E., Anderson B.J. $Pc1$ waves in the ionosphere: a statistical study // J. Geophys. Res. V. 101. P. 7843–7857. 1996.
<https://doi.org/10.1029/96JA00082>
- Feygin F.Z., Kleimenova N.G., Pokhotelov O.A., Parrot M., Priкner K., Mursula K., Kangas J., Pikkarainen T. Nonstationary pearl pulsations as a signature of magnetospheric disturbances // Ann. Geophysicae. V. 18. № 5. P. 517–522. 2000.
<https://doi.org/10.1007/s00585-000-0517-9>
- Fraser B.J. Polarization of $Pc1$ pulsations at high and middle latitudes // J. Geophys. Res. V. 80. № 19. P. 2797–2807. 1975.
<https://doi.org/10.1029/JA080i019p02797>
- Fraser B.J., Kemp W.J., Webster D.J. Ground-satellite study of a $Pc1$ ion cyclotron wave event // J. Geophys. Res. V. 94. P. 11855–11863. 1989.
<https://doi.org/10.1029/JA094iA09p11855>
- Gou X., Li L., Zhang Y., Zhou B., Feng Y., Cheng B., Raita T., Liu J., Zhima Z., Shen X. Ionospheric $Pc1$ waves during a storm recovery phase observed by the China Seismo-Electromagnetic Satellite // Ann. Geophysicae. V. 38. № 3. P. 775–787. 2020.
<https://doi.org/10.5194/angeo-38-775-2020>
- Kangas J., Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (a review) // Space Sci. Rev. V. 83. P. 435–512. 1998.
<https://doi.org/10.1023/A:1005063911643>
- Kerttula R., Mursula K., Pikkarainen T. Storm-time $Pc1$ activity at high and middle latitudes // J. Geophys. Res. V. 106. № A4. P. 6213–6227. 2001.
<https://doi.org/10.1029/2000JA900125>
- 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>
- Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I., Dovbnaya B.V., Zotov O.D. On the relation of giant pulsations (Pg) to pulsations in the $Pc1$ band (the “pearls” series) // Int. J. Geomagnetism and Aeronomy. Publ. AGU. V. 5. № 2. GI2001. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003GI000062>
- Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I., Dovbnaya B.V. Patterns of simultaneous observations of high-latitude magnetic impulses ($MIEs$) and impulsive bursts in the $Pc1$ – 2 band // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 1680–1689. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.12.003>
- Loto’aniu T.M., Fraser B.J., Waters C.L. The modulation of electromagnetic ion cyclotron waves by $Pc5$ ULF waves // Ann. Geophysicae. V. 27. № 1. P. 121–130. 2009.
<https://doi.org/10.5194/ANGEO-27-121-2009>
- MATLAB, Wavelet Toolbox Documentation. https://www.mathworks.com/help/wavelet/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. Accessed December 17, 2018.
- Mazur V.A., Potapov A.S. The evolution of pearls in the Earth’s magnetosphere // Planet. Space Sci. V. 31. № 8. P. 859–863. 1983.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(83\)90139-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(83)90139-3)
- Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., Amin R., Anderson R.R. A new model of the location of the plasmopause: CRRES results // J. Geophys. Res. V. 107. № A11. 1339. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA009211>
- Nomura R., Shiokawa K., Pilipenko V., Shevtsov B. Frequency-dependent polarization characteristics of $Pc1$ geomagnetic pulsations observed by multipoint ground stations at low latitudes // J. Geophys. Res. V. 116. A01204. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015684>
- Sucksdorff E. Occurrences of rapid micropulsations at Sodankylä during 1932 to 1935 // Terrest. Magn. Atmosp. Electr. V. 41. P. 337–344. 1936.
<https://doi.org/10.1029/TE041i004p00337>
- Usanova M. E., Mann I.R., Rae I.J., Kale Z.C., Angelopoulos V., Bonnell J.W., Glassmeier K.-H., Auster H.U., Singer H.J. Multipoint observations of magnetospheric compression-related EMIC $Pc1$ waves by THEMIS and CARISMA // Geophys. Res. Lett. V. 35. L17S25. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2008GL034458>
- Verbanac G., Pierrard V., Bandić M., Darrouzet F., Rauch J.-L., Décréau P. The relationship between plasmopause, solar wind and geomagnetic activity between 2007 and 2011 // Ann. Geophysicae. V. 33. № 10. P. 1271–1283. 2015.
<https://doi.org/10.5194/angeo-33-1271-2015>