

УДК 550.385.4

ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ B_z -КОМПОНЕНТЫ ММП КАК ТРИГГЕР ИЗОЛИРОВАННЫХ ВСПЛЕСКОВ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В ОБЛАСТИ ДНЕВНОГО ПОЛЯРНОГО КАСПА

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

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

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

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

Поступила в редакцию 11.12.2020 г.

После доработки 14.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Выполнено исследование одновременных наблюдений изолированных всплесков пульсаций *ipcl* (в диапазоне частот 1.3–6.3 мГц) в области дневного полярного каспа и динамики B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Обнаружено, что в 61% случаев (первая группа) изолированные всплески *ipcl* наблюдаются в области каспа после изменения направления B_z -компоненты ММП с северного на южное, и в 39% случаев (вторая группа) при изменении направления B_z с южного на северное. Всплески двух групп имели примерно одинаковый спектральный состав, но различались по интенсивности, продолжительности волновых пакетов и условиям возбуждения. В зависимости от смены знака B_z -компоненты (с положительного на отрицательное или с отрицательного на положительное) спектральная плотность пульсаций *ipcl* достигала максимального значения через 10–20 мин или 5–10 мин, соответственно после момента переориентации B_z . Показано, что динамика других геоэффективных параметров солнечного ветра и ММП была относительно стабильной до момента переориентации B_z -компоненты и после, т.е. во время возбуждения волновых пакетов пульсаций *ipcl*. Совокупность экспериментальных фактов позволяет предположить, что единственным триггером изолированных всплесков *ipcl* в условиях умеренно-возмущенной магнитосферы может быть изменение направления B_z -компоненты ММП не только с северного на южное, но и с южного на северное. Высказана гипотеза о возбуждении изолированных всплесков пульсаций *ipcl*, наблюдающихся в области дневного каспа, в результате стационарного пересоединения как в предполуденном секторе магнитосферы, так и вблизи полярных каспов.

DOI: 10.31857/S0016794021040088

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно считается, что магнитные возмущения на Земле и, в частности, возбуждение ультранизкочастотных (УНЧ) волн контролируется солнечным ветром и межпланетным магнитным полем (ММП), особенно вертикальной компонентой ММП (B_z). От направления B_z -компоненты существенно зависит процесс пересоединения между силовыми линиями межпланетного и геомагнитного поля, положение его локализации. В свою очередь, процессы пересоединения ответственны за поступление энергии солнечного ветра в магнитосферу, изменение топологии магнитного поля, возбуждение УНЧ-волн и многие другие явления [Нишида, 1980; Прист и Форбс, 2005]. Из литературных источников известны примеры генерации УНЧ-волн (геомагнитных пульсаций) в магнитосфере, связанных со сменой знака B_z -компоненты ММП. Так, в работе [Большакова и Троицкая, 1982]

показано, что при изменении направления B_z -компоненты ММП с северного направления на южное в области дневного каспа наблюдаются отдельные интенсивные всплески длиннопериодных пульсаций *ipcl*. Заметим, что иррегулярные геомагнитные пульсации *ipcl* (irregular pulsations continuous long period) с периодами от 3 до 15–20 мин исследуются, начиная с пионерских работ [Troitskaya et al., 1973; Большакова и др., 1975]. В этих и ряде других работ, например, [Клейменова и др., 1985; Friis-Christensen et al., 1988; Dunlop et al., 1992; Куражковская и Клайн, 1997; Vennerstrom, 1999; Pilipenko et al., 2015], показано, что *ipcl* являются типичным режимом высокоширотных областей магнитосферы.

Согласно работе [Белаховский и Ролдугин, 2008] резкая смена знака B_z -компоненты с положительного на отрицательный знак в ходе развития

интенсивной магнитной бури приводит к возбуждению геомагнитных пульсаций в диапазоне $Pc5$ ($T = 150\text{--}600$ с). Даже в условиях спокойной магнитосферы ($Kp \sim 0$) переориентация B_z -компоненты с северного направления на южное направление оказывается существенным фактором, влияющим на усиление интенсивности пульсаций $ipcl$ в диапазоне 2–6 мГц [Куражковская и др., 2016]. Более того, экспериментальные исследования связи возбуждаемых геомагнитных пульсаций с вертикальной компонентой ММП показали, что B_z -компонента оказывает значительное влияние на их характеристики. Так, в работе [Troitskaya et al., 1980] показано, что амплитуда пульсаций $ipcl$ увеличивается с ростом отрицательных значений B_z -компоненты. Из результатов исследования [Куражковская и др., 2016] следует, что увеличение скорости изменения B_z -компоненты приводит к уменьшению средней частоты пульсаций $ipcl$. Иными словами B_z -компонента контролирует не только амплитуду, но и спектральный состав длиннопериодных иррегулярных пульсаций $ipcl$.

В работе [Куражковская и Клайн, 2017] отмечалось, что в области дневного каспа наблюдаются отдельные иррегулярные УНЧ-волны (всплески) аномально большой амплитуды, диапазон частот которых совпадал с частотным составом пульсаций $ipcl$. Такие всплески были условно названы “изолированными всплесками пульсаций $ipcl$ ”, поскольку в интервале времени $\pm 3\text{--}4$ ч до их начала и после не наблюдалось других интенсификаций магнитного поля. Генерация подобных всплесков в области дневного каспа могла быть обусловлена переориентацией B_z -компоненты ММП с северного направления на южное, как ранее отмечалось в работе [Большакова и Троицкая, 1982]. Однако при анализе условий возбуждения изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ [Куражковская и Клайн, 2017] мы заметили, что некоторые всплески наблюдаются в области дневного каспа после переориентации B_z -компоненты ММП с южного направления на северное.

Как отмечалось выше, изменение направления B_z -компоненты с северного на южное приводило к возбуждению или интенсификации некоторых режимов геомагнитных пульсаций. Вопрос о том, может ли играть аналогичную роль переориентация B_z -компоненты с южного направления на северное в формировании режимов пульсаций, во многом остается открытым.

Настоящая работа является продолжением исследования [Куражковская и Клайн, 2017] и посвящена анализу особенностей возбуждения изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ аномально большой амплитуды, наблюдаемых в области дневного каспа после переориентации B_z -компо-

ненты ММП с северного направления на южное и с южного направления на северное.

2. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы цифровые одномоментные данные Антарктической обс. Мирный (код MIR, исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = -76.93^\circ$, $\Lambda' = 122.92^\circ$) за период 1989–1991 гг., 1995–2003 гг. из Мирового центра данных по солнечно-земной физике (МЦД по СЗФ, Москва) (http://www.wdcb.ru/stp/data/geo_min.val/). Кроме того, использовались среднечасовые и одномоментные данные параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) из базы данных OMNI, полученные с сайта (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>) за эти же интервалы времени.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Одномоментные данные регистрации магнитного поля в обс. Мирный предварительно фильтровались в диапазоне частот 1.3–6.3 мГц и после фильтрации выполнялся их спектрально-временной анализ. Критерии отбора изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ и их общая характеристика достаточно подробно изложены в работе [Куражковская и Клайн, 2017]. Здесь мы отметим, что в анализ были включены всплески пульсаций $ipcl$, для которых имелись данные параметров солнечного ветра и ММП. Всего было рассмотрено 113 изолированных всплесков пульсаций $ipcl$. Анализируемые всплески пульсаций $ipcl$ наблюдались преимущественно в дневном секторе магнитосферы (07–14 MLT) при умеренной геомагнитной активности ($Kp \sim 2\text{--}3$). В южном полушарии при таком уровне возмущенности положение обс. Мирный соответствует широте дневного полярного каспа [Newell et al., 1989; Zhou et al., 2000].

Первоначально проводилось одновременное сопоставление случаев наблюдения изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ и динамики B_z -компоненты ММП. Анализ показал, что в 61% случаев всплески $ipcl$ возникают после изменения направления B_z -компоненты с северного на южное и в 39% случаев после изменения ориентации B_z -компоненты с южного на северное. В связи с этим все случаи наблюдения изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ были условно разбиты на две группы: 1) всплески, наблюдающиеся после смены знака B_z -компоненты с (+) на (–) (70 случаев), и 2) всплески, наблюдающиеся после смены знака B_z -компоненты с (–) на (+) (43 случая).

3.2. На рисунке 1 приведены типичные примеры наблюдения изолированных всплесков пульсаций $ipcl$, относящихся к первой и второй группам, а также их динамические спектры. В верхней

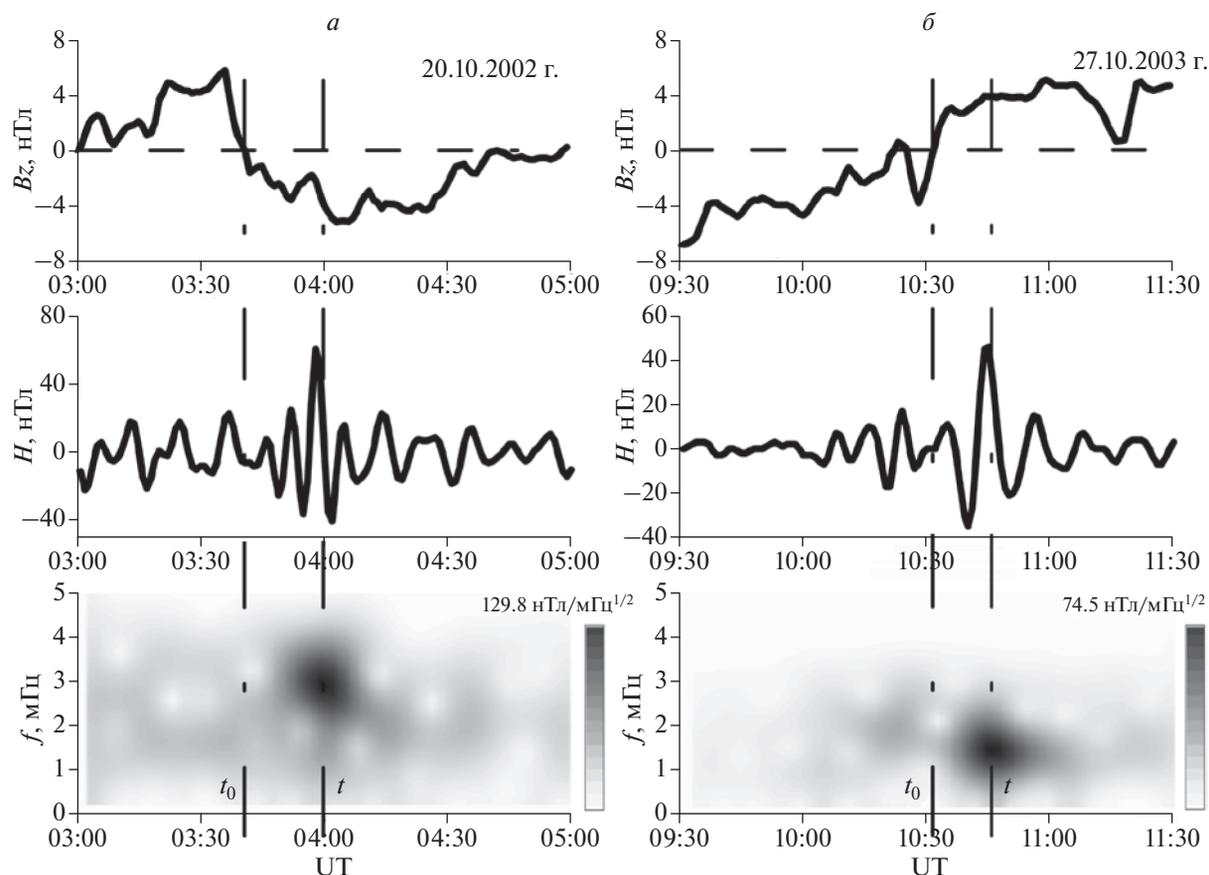


Рис. 1. Примеры наблюдения изолированных всплесков длиннопериодных иррегулярных пульсаций *ipcl* в obs. Мирный (H -компонента) 20.10.2002 г. и 27.10. 2003, возникающих после переориентации B_z -компоненты ММП с северного направления на южное (*a*) и с южного на северное (*b*), соответственно. В верхней части рисунка – вариации B_z -компоненты ММП; вертикальные штрих-пунктирные линии – моменты перехода B_z -компоненты через ноль (t_0) и достижения максимума спектральной плотности пульсаций (t).

части рисунка показана вариация B_z -компоненты ММП, из которой видно различное изменение ее направления. Вертикальными штрихпунктирными линиями обозначены моменты переориентации B_z -компоненты (t_0) и время наблюдения максимальной спектральной плотности всплесков *ipcl* (t). Из рисунка 1 видно, что после смены знака B_z -компоненты спектральная плотность изолированных всплесков пульсаций *ipcl* через некоторое время – Δt ($\Delta t = t - t_0$) достигает максимального значения. Величина Δt использовалась нами как одна из характеристик всплесков *ipcl* двух групп.

Распределение времени сдвига $-\Delta t$ между максимумом спектральной плотности и моментом перехода B_z -компоненты через ноль для двух групп изолированных всплесков пульсаций *ipcl* представлено на рис. 2. Величина Δt изменяется, в основном, от 5 до 40 мин, но в некоторых случаях достигает 70–80 мин. После переориентации B_z -компоненты с северного направления на южное в доминирующем числе случаев $\Delta t \sim 10$ –20 мин

и $\Delta t \sim 5$ –10 мин, если всплески наблюдаются после обратного изменения направления B_z -компоненты.

Кроме Δt в качестве характеристик двух групп всплесков *ipcl* рассматривались максимальная амплитуда – A , которая находилась из выражения: $A = \sqrt{H^2 + D^2}$, где H и D – максимальные значения меридиональной и азимутальной составляющих магнитного поля; продолжительность – τ и частота – f волновых пакетов. Оценки средних и медианных значений этих характеристик представлены в табл. 1.

Из таблицы 1 видно, что средняя амплитуда всплесков первой группы больше, а продолжительность их волновых пакетов меньше, чем всплесков, относящихся ко второй группе. Средняя частота заполнения волновых пакетов *ipcl* двух групп одинакова. Среднее время сдвига Δt всплесков *ipcl*, относящихся к первой группе заметно больше по сравнению с Δt для второй группы. Таким образом, всплески, наблюдаемые в об-

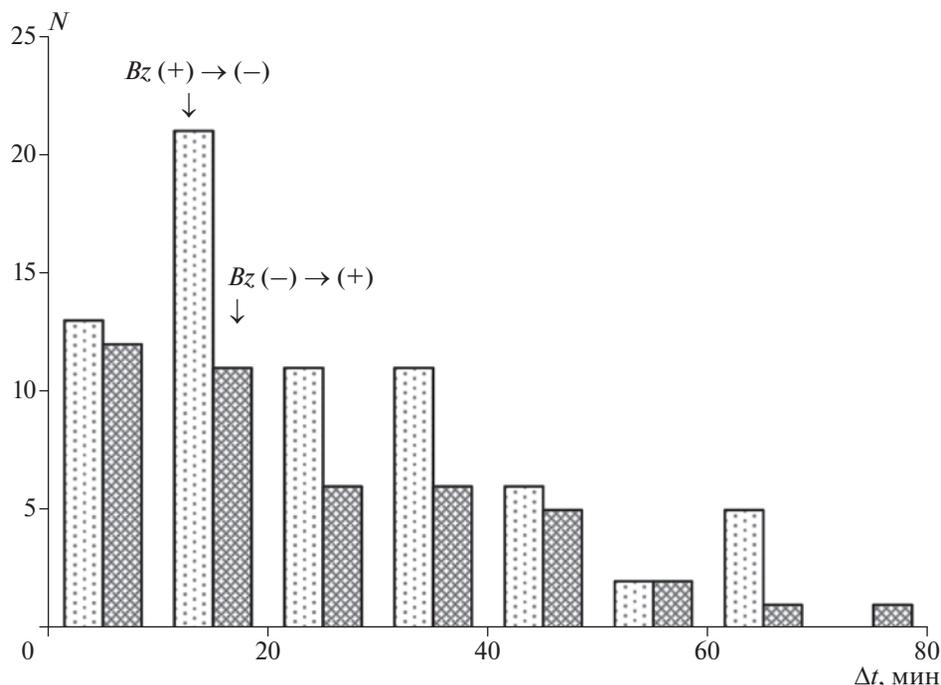


Рис. 2. Распределение времени сдвига (Δt) между моментом перехода B_z -компоненты ММП через ноль и максимумом спектральной плотности всплесков пульсаций $ipcl$ для первой и второй (светлая и темная гистограмма, соответственно) групп всплесков.

ласти каспа после разной переориентации B_z , имеют примерно одинаковый спектральный состав, но различны интенсивность, продолжительность волновых пакетов и время достижения максимальной спектральной плотности после смены направления B_z .

На рисунке 3 показаны суточные вариации нормированной на максимальное число случаев частоты наблюдения N/N_{max} , амплитуды A и величины временного сдвига Δt изолированных всплесков пульсаций $ipcl$, возникающих после разной переориентации B_z -компоненты. Аппроксимация экспериментальных данных полиномами четвертой степени показана сплошными линиями. Независимо от характера смены знака B_z -компоненты распределения N/N_{max} подобны

по форме и по положению максимумов частоты наблюдения. Оба распределения асимметричны относительно полуденного меридиана. Видно, что всплески $ipcl$ как первой, так и второй группы в дополуночном секторе (10–11) MLT. Положение максимума суточного хода всплесков $ipcl$ относительно полуденного меридиана не зависит от переориентации B_z -компоненты с северного направления на южное или, наоборот, с южного на северное. Вероятность наблюдения изолированных всплесков $ipcl$ двух групп в послеполуденное время относительно мала.

Суточные вариации средних амплитуд изолированных всплесков $ipcl$ различаются по положению максимумов для двух групп (рис. 3). Так, по-

Таблица 1. Средние и медианные значения основных характеристик изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ при различной переориентации B_z -компоненты ММП

Характеристики всплесков $ipcl$	Переориентация B_z -компоненты ММП с (+) на (-)		Переориентация B_z -компоненты ММП с (-) на (+)	
	средние значения	медианные значения	средние значения	медианные значения
A , нТл	152.6 ± 9.7	131.8	143.4 ± 8.2	125.0
τ , мин	78.9 ± 2.9	75.0	86.4 ± 3.6	75.0
f , мГц	2.20 ± 0.04	2.20	2.20 ± 0.05	2.30
Δt , мин	26.4 ± 2.1	22.0	23.9 ± 2.7	18.0

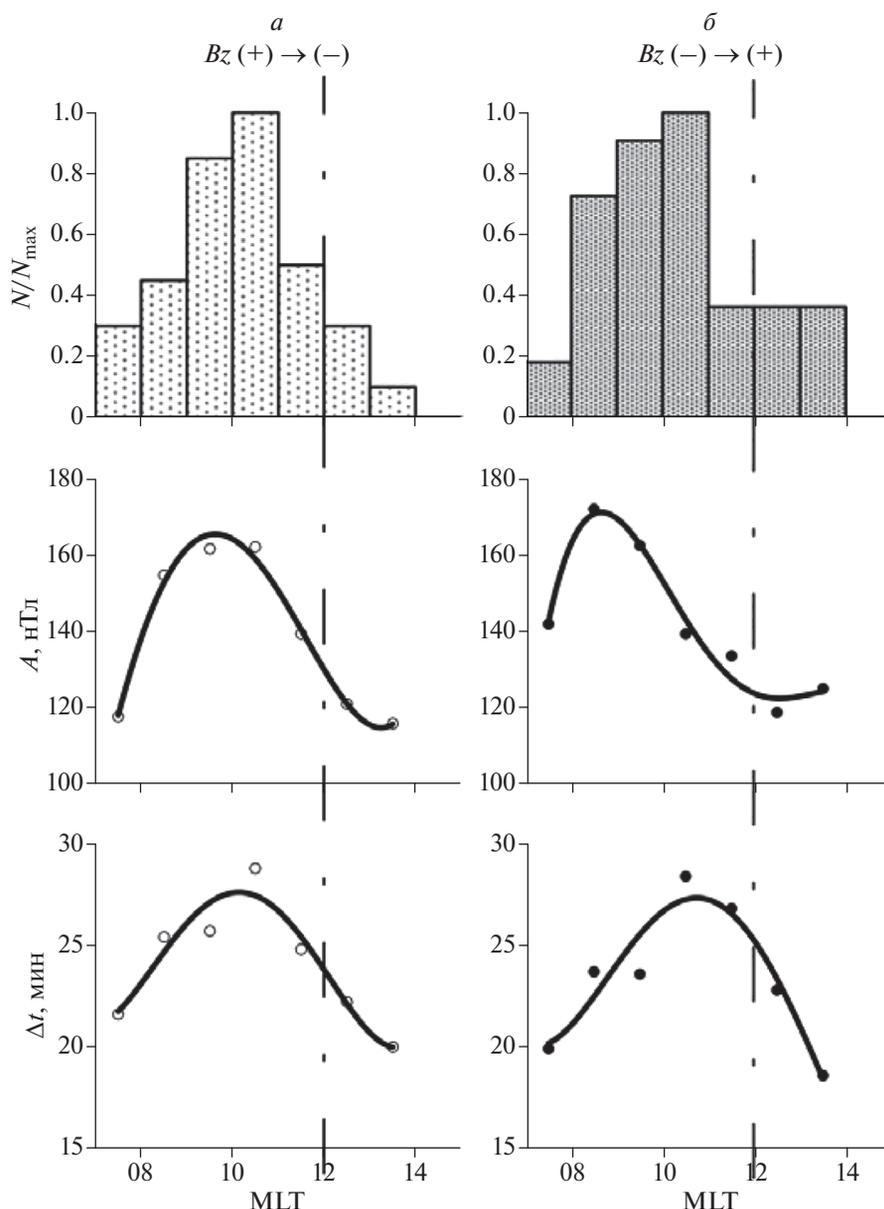


Рис. 3. Суточная вариация нормированной на максимальное число случаев частоты наблюдения N/N_{max} , амплитуды A и величины временного сдвига Δt изолированных всплесков пульсаций $ipcl$, наблюдающихся после переориентации Bz -компоненты ММП с северного направления на южное (а) и с южного на северное (б).

сле переориентации Bz -компоненты с северного направления на южное максимум интенсивности всплесков наблюдается в (09–10) MLT, а при изменении направления с южного на северное в (08–09) MLT. Временной интервал между максимумами амплитуд всплесков $ipcl$ двух групп составляет 1 час.

Поведение зависимости Δt от локального времени для двух групп всплесков $ipcl$ примерно одинаково. В предполуденном секторе наблюдается увеличение времени сдвига Δt с 07 MLT до достижения максимума в 10.30 MLT. После 11 MLT на-

чинается постепенное уменьшение Δt , которое продолжается и в послеполуденном секторе. Максимумы Δt в обоих случаях приходятся на (10–11) MLT, т.е. наибольшие значения времени сдвига между моментом переориентации Bz -компоненты и достижением максимальной спектральной плотности наблюдаются вблизи полуденного меридиана. По мере удаления от полуденного меридиана величина Δt уменьшается (рис. 3).

3.3. Рассмотрим условия в межпланетной среде, на фоне которых происходит возбуждение изолированных всплесков пульсаций $ipcl$ двух групп по-

сле изменения направления вертикальной компоненты ММП. Анализ геомагнитной активности, параметров солнечного ветра и ММП, проводился по часовым данным базы данных OMNI. Для характеристики геомагнитной активности использовались индексы Kp , Dst и AE , которые отражают глобальную возмущенность, возмущения в средних и экваториальных широтах и возмущения в зоне полярных сияний, соответственно. Величина Kp индекса бралась, как принято в базе данных OMNI. Состояние плазмы солнечного ветра характеризовалось следующими параметрами: концентрация n , скорость V , динамическое давление солнечного ветра $P_{dyn} = \rho V^2$ (ρ – плотность плазмы). В качестве характеристик ММП рассматривались: модуль напряженности B , широта ММП θ (угол между вектором B и его проекцией на плоскость эклиптики), долгота ММП ϕ (угол между проекцией вектора B на плоскость эклиптики и B_x -компонентой ММП), B_x -, B_y -, B_z -компоненты ММП. Анализируемые параметры солнечного ветра и ММП рассматривались в солнечно-эклиптической системе координат.

Первоначально были построены распределения геомагнитных индексов, параметров плазмы солнечного ветра и ММП для часовых интервалов, во время которых наблюдались изолированные всплески *ipcl* двух групп. Поскольку распределения геомагнитных индексов и параметров плазмы солнечного ветра для случаев наблюдения всплесков *ipcl* обеих групп имели примерно одинаковую форму, диапазоны изменения и положение максимумов независимо от характера переориентации B_z -компоненты, мы их не будем здесь приводить. Однако следует отметить, что во время наблюдения всплесков *ipcl* как первой, так и второй групп магнитосфера была умеренно возмущена, о чем свидетельствуют значения индексов геомагнитной активности. Так, величина индексов во время появления всплесков *ipcl* двух групп преимущественно равнялась $Kp = 20-30$, $Dst = -20-0$ нТл, $AE = 50-100$ нТл. Параметры плазмы солнечного ветра не сильно различались во время наблюдения всплесков *ipcl* двух групп и в доминирующем числе случаев составляли $n = 4-8$ см⁻³, $V = 350-400$ км/с, $P_{dyn} = 1-3$ нПа.

Наиболее существенные различия были обнаружены в распределениях параметров ММП во время наблюдения всплесков *ipcl* двух групп, поэтому остановимся подробнее на их анализе. На рисунке 4 показаны зависимости частоты появления изолированных всплесков *ipcl* двух групп от B , угла ϕ , угла θ , B_x -, B_y -, B_z -компонент. Видно, что распределения перечисленных параметров различаются во время возбуждения всплесков *ipcl* двух групп. Например, всплески *ipcl* первой и второй группы в большинстве случаев наблюдаются при $B = 3-6$ нТл и $B = 6-9$ нТл,

соответственно, т.е. величина вектора напряженности ММП после изменения направления B_z -компоненты с положительного на отрицательное меньше, чем при обратном изменении ориентации B_z . Распределения угла ϕ , характеризующего направление вектора напряженности ММП в плоскости эклиптики различны для случаев наблюдения всплесков *ipcl* двух групп. Всплески первой группы появляются, главным образом, при $\phi = 270^\circ-360^\circ$, а второй группы при $\phi = 90^\circ-180^\circ$. Исходя из величин углов ϕ , можно отметить, что всплески первой группы преимущественно наблюдались при направлении вектора ММП к Солнцу, а второй группы от Солнца. Величина угла θ также была различной и принадлежала диапазону $-30^\circ < \theta < 0^\circ$ и $0^\circ < \theta < 30^\circ$ в случае наблюдения всплесков первой и второй группы, соответственно (рис. 4).

Из рисунка 4 также видно различное поведение B_x -, B_y -, B_z -компонент ММП во время наблюдения всплесков *ipcl* двух групп. Всплески первой группы в доминирующем числе случаев наблюдались при $B_x > 0$, $B_y < 0$, $B_z < 0$, второй группы $B_x < 0$, $B_y > 0$, $B_z > 0$. Таким образом, характеристики ММП, благоприятные для формирования изолированных всплесков *ipcl* первой и второй групп после смены направления B_z -компоненты, были различными, как по величине, так и по направлению вектора напряженности ММП B и его компонент (рис. 4).

Кроме того, был выполнен анализ одноминутных данных ММП и плазмы солнечного ветра методом наложения эпох вблизи момента (± 2 ч) переориентации B_z -компоненты. Усредненная динамика B_z -, B_x - и B_y -компонент, модуля напряженности ММП – B , концентрации протонов – n , скорости – V , динамического давления – P_{dyn} солнечного ветра и за два часа до переориентации B_z -компоненты и 2 ч после приведена на рис. 5. За реперную точку выбран момент изменения знака B_z -компоненты ММП. Видно, что изолированные всплески пульсаций *ipcl*, возникающие после изменения направления B_z -компоненты как с северного на южное направления, так и наоборот, наблюдались на фоне относительно стабильных параметрах плазмы солнечного ветра. Качественное поведение n , V , и P_{dyn} солнечного ветра как до переориентации B_z , так и после примерно одинаково для двух групп всплесков *ipcl*. Отсутствие резких флуктуаций в поведении данных параметров указывает на то, что процессы резкого сжатия или расширения магнитосферы, а также приход фронта ударной волны не имеют отношения к формированию изолированных всплесков пульсаций *ipcl*. Необходимо отметить, что в поведении B_x - и B_y -компонент ММП в отличие от B_z не наблюдалось резкой смены направления вблизи реперной точки. Однако динамика B_x - и B_y -компонент ММП

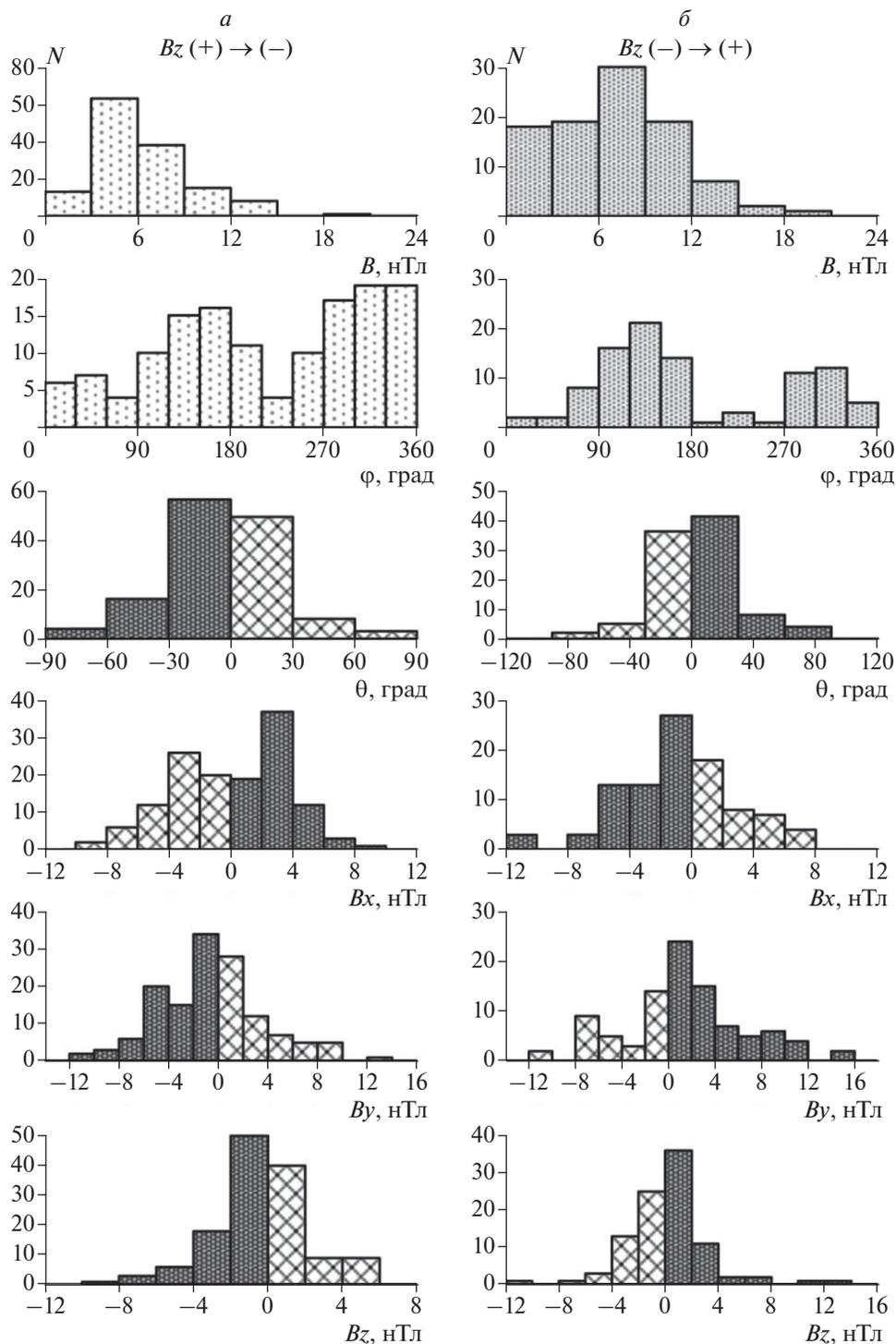


Рис. 4. Зависимость частоты наблюдения изолированных всплесков *ipcl* первой (а) и второй (б) групп от параметров ММП.

различна во время наблюдения всплесков двух групп. Так, для динамики V_x -компоненты характерны небольшие флуктуации до момента переориентации V_z и после, если V_z -компонента изменяет знак с положительного на отрицательный. При этом V_y -компонента сохраняет отрицатель-

ное направление практически на всем временном интервале. Всплески *ipcl* наблюдаются на фоне отрицательного направления V_x - и положительного V_y -компоненты, в случае изменения направления V_z -компоненты с отрицательного на положительное. Таким образом, судя по характеру

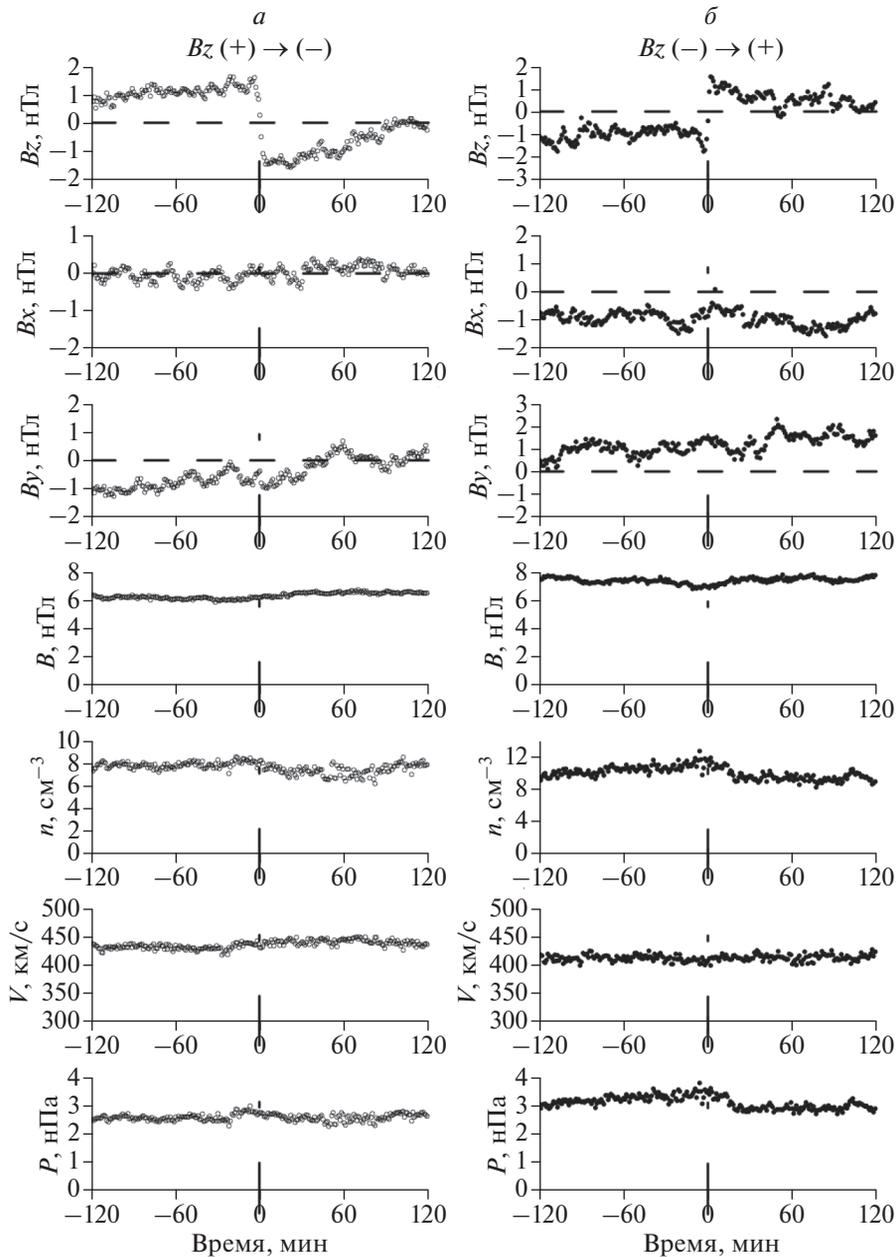


Рис. 5. Динамика параметров (B_z -, B_x -, B_y -компонент, модуля B) ММП и плазмы солнечного ветра (концентрации n , скорости V , динамического давления P_{dyn}), полученная методом наложенных эпох для случаев наблюдения первой (а) и второй (б) групп всплесков пульсаций *ipcl*.

поведения параметров ММП и плазмы солнечного ветра (рис. 5), в условиях умеренно-возмущенной магнитосферы единственным параметром, способствующим возбуждению изолированных всплесков *ipcl* может быть переориентация B_z -компоненты ММП, как с северного направления на южное, так и с южного на северное.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что изолированные всплески *ipcl*, наблюдающиеся в об-

ласти дневного каспа, возбуждаются как после смены знака B_z -компоненты ММП с положительного на отрицательный, так и, наоборот, с отрицательного на положительный. При этом другие геоэффективные параметры, такие как скорость и динамическое давление солнечного ветра оставались относительно стабильными вблизи момента начала возбуждения всплесков. Следовательно, эти параметры не могут играть роль триггера изолированных всплесков пульсаций *ipcl*. Таким образом, при умеренной геомагнитной активности единственным триггером всплес-

ков может быть переориентация B_z -компоненты ММП. Причем в отличие от пульсаций $Pc5$, на ход развития которых изменение направления B_z -компоненты ММП с отрицательного на положительное направление не оказывает никакого влияния [Белаховский и Ролдугин, 2008], изолированные всплески пульсаций $ipcl$ возникают и после такой смены знака B_z .

Поскольку изолированные всплески пульсаций $ipcl$ наблюдаются после переориентации B_z -компоненты на фоне относительно стабильных других параметрах плазмы солнечного ветра и ММП, то можно предположить, что их возбуждении стимулировано процессами пересоединения между межпланетным и геомагнитным полем. Согласно существующим представлениям [Прист и Форбс, 2005], переориентация B_z -компоненты с северного направления на южное приводит к процессу пересоединения между силовыми линиями геомагнитного и межпланетного полей в подсолнечной области магнитосферы. Когда B_z -компонента переориентируется с южного направления на северное наблюдается другой сценарий: происходит так называемое, высокоширотное пересоединение вблизи ночных полярных каспов, после чего магнитный поток смещается на дневную сторону [Li et al., 2008]. Переориентация B_z -компоненты существенно влияет на магнитосферную активность. Спокойные геомагнитные условия наблюдаются при северном направлении ММП ($B_z > 0$), т.е. когда прекращается поступление энергии солнечного ветра в магнитосферу. Поступление энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли с ростом величины южного ММП ($B_z < 0$) приводит к значительному усилению магнитных возмущений [Akasofu, 1980].

Из наших данных следует, что изолированные всплески $ipcl$ первой группы наблюдаются преимущественно при $B_z < 0$, а второй группы при $B_z > 0$ (рис. 4). Следовательно, процессы пересоединения как в подсолнечной области, так и в высокоширотной области приводят к возбуждению пульсаций $ipcl$. Это означает, что в полярный касп проникают волны из разных областей локализации процессов пересоединения. Важно отметить, что при $B_z < 0$ и $B_z > 0$ формируется режим иррегулярных длиннопериодных пульсаций с примерно одинаковым спектральным составом, но различной интенсивности и продолжительности волновых пакетов. Различия в уровне амплитуд и продолжительности, всплесков $ipcl$, наблюдаемых после разной смены направления B_z -компоненты, могут быть обусловлены разными межпланетными условиями во время их возбуждения (рис. 4).

Как известно, существуют, по крайней мере, два типа пересоединения: импульсное, так называемое FTEs (Flux Transfer Events), и стационар-

ное. По-видимому, изолированные всплески $ipcl$ не могут быть следствием импульсного пересоединения, поскольку их продолжительность существенно больше, чем характерные времена FTEs (1–2 мин). Кроме того, всплески $ipcl$ наблюдаются преимущественно в предполуденном секторе в отличие от FTEs, для которых характерен послеполуденный максимум вероятности наблюдения [Walsh et al., 2014]. Другой типичной чертой FTEs является их появление при южном направлении ММП. Согласно спутниковым наблюдениям при северном направлении ММП случаи FTEs не наблюдаются [Прист и Форбс, 2005]. В отличие от FTEs анализируемые нами всплески $ipcl$, по крайней мере, в 39% случаев регистрируются при северном направлении ММП.

Скорее всего, возбуждение всплесков пульсаций $ipcl$ инициируется стационарным пересоединением. Косвенным подтверждением последнего является совпадение средней продолжительности запаздывания Δt (~20–30 мин) между моментом переориентации B_z -компоненты и моментом достижения максимальной спектральной плотности всплесков $ipcl$ со временем продолжительности эрозии на дневной стороне магнитосферы. Согласно [Holzer and Reid, 1975] время установления стационарного состояния пересоединения составляет примерно 30 мин.

Согласно [Haaland et al., 2014] характеристики магнитопаузы и магнитослоя на флангах магнитосферы различаются. В частности, в предполуденном секторе магнитопауза более турбулентна, чем в послеполуденном секторе из-за асимметрии геометрии головной ударной волны. Именно в предполуденном секторе преимущественно и наблюдаются всплески $ipcl$ (рис. 3) независимо от характера смены направления B_z -компоненты. Турбулентность плазмы способствует развитию процессов пересоединения [Antonova and Ovchinnikov, 2002; Lazarian et al., 2020]. Кроме этого, спутниковые наблюдения [Phan et al., 2010] показали, что развитие процессов пересоединения контролируется параметром β солнечного ветра, равным отношению теплового давления к магнитному: $\beta = NkT/(B^2/8\pi)$, где N и T – плотность (см^{-3}) и температура (K) плазмы протонов, B – величина межпланетного магнитного поля (нТл). Согласно [Trenchi et al., 2008] пересоединение наиболее вероятно при $\beta \leq 2$. Однако динамика β параметра, полученная нами по одноминутным данным методом наложения эпох для случаев наблюдения всплесков пульсаций $ipcl$ двух групп (рис. 6) свидетельствует о том, в момент переориентации B_z -компоненты с северного направления на южное и с южного на северное величина β была >3 и >10 , соответственно. При построении рис. 6 за реперную точку, также как и на рис. 5, принимался момент смены знака B_z -компоненты

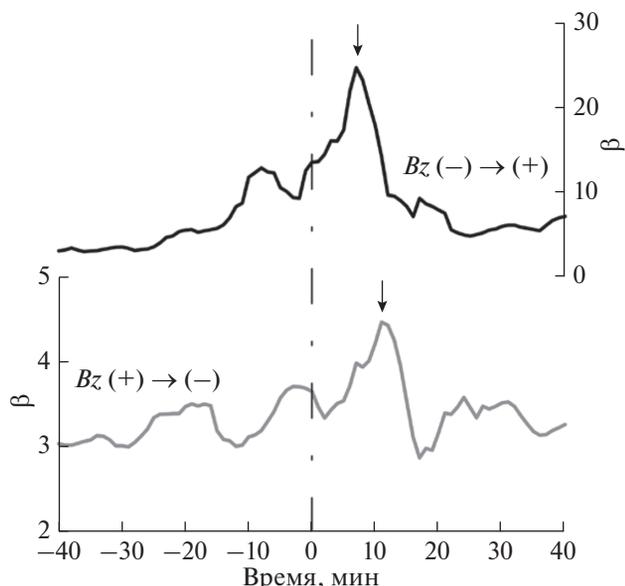


Рис. 6. Динамика параметра β солнечного ветра, полученная методом наложенных эпох для случаев наблюдения всплесков пульсаций *ipcl*, наблюдающихся после переориентации B_z -компоненты ММП с северного направления на южное и с южного на северное (серая и черная кривая, соответственно).

ММП. Из рисунка 6 видно, что после смены знака B_z параметр β постепенно увеличивается и через некоторое время достигает своего максимального значения. Во время наблюдения всплесков *ipcl* первой и второй группы время между моментом переориентации B_z -компоненты и моментом максимума параметра β составляет >10 мин и <10 мин, соответственно. Следует отметить, что интервалы времени, в течение которых параметр β солнечного ветра достигает максимума после изменения направления B_z -компоненты ММП, примерно совпадают с величиной Δt . Вполне вероятно, что время сдвига Δt между моментом переориентации B_z -компоненты и моментом достижения максимума спектральной плотности всплесков *ipcl* после смены знака B_z -компоненты с (+) на (-) и с (-) на (+) может быть обусловлено поведением параметра β солнечного ветра. В данном случае β может играть роль управляющего параметра, поскольку он является интегральной характеристикой плазмы солнечного ветра и ММП и в полной мере отражает не только баланс теплового и магнитного давления, но и энергию потока солнечного ветра, поступающего в магнитосферу.

Необходимо отметить, что область пересоединения при $B_z < 0$ из-за влияния B_y -компоненты ММП смещается от подсолнечной точки на фланги магнитопаузы [Němeček et al., 2003]. Уменьшение величины Δt от полуденного меридиана к предполуденному и послеполуденному секторам (рис. 3)

может также косвенно свидетельствовать о том, что область возбуждения изолированных всплесков, вероятно, смещена от подсолнечной точки на фланги магнитопаузы. Учитывая эти факты, можно предположить, что область пересоединения при $B_z < 0$ расположена не в подсолнечной точке, а в предполуденном секторе (свинута ближе к каспам). С другой стороны, высокоширотное пересоединение при $B_z > 0$ локализовано вблизи каспов [Song et al., 2000]. Но, судя по величине Δt область высокоширотного пересоединения располагается не в ночном каспе, как рассматривалось ранее, начиная с модели [Dungey, 1961] и более поздних исследованиях, например, [Li et al., 2008], а в дневном каспе. Небольшое различие во времени сдвига между моментом переориентации B_z и достижением максимальной спектральной плотности всплесков *ipcl* двух групп (рис. 2) свидетельствует о достаточно близком расположении областей пересоединения при разной смене знака B_z . В связи с этим становится понятным наблюдение всплесков *ipcl* в области каспа после изменения направления B_z -компоненты как с северного на южнее, так и с южного на северное направление.

С нашей точки зрения, в условиях умеренно-возмущенной магнитосферы, судя по наземным наблюдениям изолированных всплесков *ipcl*, в предполуденном секторе магнитосферы и вблизи дневных каспов реализуется стационарное пересоединение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа одновременных наблюдений изолированных всплесков пульсаций *ipcl* (в диапазоне частот 1.3–6.3 мГц), наблюдающихся в области дневного каспа, и динамики параметров солнечного ветра и ММП обнаружено, что в 61% случаев изолированные всплески *ipcl* возникают после изменения направления B_z -компоненты ММП с северного на южное, и в 39% случаев при изменении направления B_z с южного на северное.

Показано, что динамика других геоэффективных параметров солнечного ветра и ММП была относительно стабильной до начала и после возбуждения волновых пакетов пульсаций *ipcl*. Всплески двух групп имели примерно одинаковый спектральный состав, но различались по интенсивности, продолжительности волновых пакетов и условиям возбуждения.

В зависимости от смены знака B_z -компоненты (с положительного на отрицательный или с отрицательного на положительный) спектральная плотность пульсаций *ipcl* становилась максимальной через 10–20 мин или 5–10 мин, соответственно после момента переориентации B_z . Эти вре-

менные сдвиги примерно совпадают со временем, в течение которого параметр β солнечного ветра достигает максимума после изменения направления V_z -компоненты ММП.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в условиях умеренно-возмущенной магнитосферы единственным параметром, способствующим возбуждению изолированных всплесков *ipcl*, может быть переориентация V_z -компоненты ММП как с северного направления на южное, так и с южного на северное.

Предполагается, что формирование изолированных всплесков пульсаций *ipcl*, наблюдающихся в области дневного каспа, происходит как в результате стационарного процесса пересоединения в предполуденном секторе магнитосферы, так и вследствие высокоширотного пересоединения вблизи полярных каспов.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Мирового центра данных по солнечно-земной физике (Москва) за предоставленную возможность использования геомагнитных данных обс. Мирный, создателям базы данных OMNI 2 (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) за возможность использования параметров солнечного ветра, ММП и данных *Kp*, *AE*, и *Dst* индексов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Белаховский В.Б., Ролдугин В.К.* Возбуждение $Pc5$ пульсаций при смене знака V_z -компоненты ММП // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 2. С. 188–194. 2008.
- *Большакова О.В., Троицкая В.А., Хесслер В.П.* Диагностика положения приполюсной границы дневного каспа по интенсивности высокоширотных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 15. № 4. С. 755–757. 1975.
- *Большакова О.В., Троицкая В.А.* Импульсное пересоединение как возможный источник пульсаций типа *ipcl* // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 22. № 5. С. 877–879. 1982.
- *Клейменова Н.Г., Большакова О.В., Троицкая В.А., Фриис–Кристенсен Е.* Два вида длиннопериодных геомагнитных пульсаций вблизи экваториальной границы дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 1. С. 163–164. 1985.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Особенности всплесков длиннопериодных иррегулярных геомагнитных пульсаций типа *ipcl* в области дневного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 5. С. 184–190. 1997.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Лаэров И.П.* Длиннопериодные иррегулярные пульсации в условиях спокойной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 3. С. 314–323. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016030111>
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Изолированные всплески иррегулярных геомагнитных пульсаций в области дневного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 609–622. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017040113>
- *Нушида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 299 с. 1980.
- *Прист Э., Форбс Т.* Магнитное пересоединение: магнитогеодинамическая теория и приложения. М.: Физматлит, 592 с. 2005.
- *Akasofu S.I.* The solar wind-magnetosphere energy coupling and magnetospheric disturbances // Planet. Space Sci. V. 28. P. 495–509. 1980. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3652-5_12
- *Antonova E.E., Ovchinnikov I.L.* Reconnection in the conditions of developed turbulence // Advances in Space Research. V. 29. Issue 7. P. 1063–1068. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00022-4)
- *Dungey J.W.* Interplanetary magnetic field and auroral zones // Phys. Rev. Letts. V. 6. P. 47–48. 1961. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
- *Dunlop I.S., Menk F.N., Hansen H.J., Fraser B.J., Morris R.J.* A multistation study of long period geomagnetic pulsations in the polar cleft and cusp // Anare Res. Notes. Burns G.B. and Duldig M.L. (Eds). № 88. P. 29–41. 1992.
- *Friis-Christensen E., Vennerstrom S., Clauer C.R., McHenry M.A.* Irregular magnetic pulsations in the polar cleft caused by traveling ionospheric convection vortices // Adv. Space Res. V. 8. № 9–10. P. 311–314. 1988. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0979-3_11
- *Haaland S., Reistad J., Tenfjord P., Gjerloev J., Maes L., DeKeyser J., Maggiolo R., Anekallu C., Dorville N.* Characteristics of the flank magnetopause: Cluster observations // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 119. P. 9019–9037. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA020539>
- *Holzer T.E., Reid G.C.* The response of the dayside magnetopause-ionosphere system to time-varying field line reconnection at the magnetopause. 1. Theoretical model // J. Geophys. Res. V. 80. P. 2041–2049. 1975. <https://doi.org/10.1029/JA080i016p02041>
- *Lazarian A., Eyink G.L., Jafari A., Kowal G., Li H., Xu S., Vishniac E.T.* 3D Turbulent Reconnection: Theory, Tests & Astrophysical Implications // arXiv:2001.00868v1 [astro-ph.HE]. 2020.
- *Li W., Raeder J., Thomsen M. F., Lavraud B.* Solar wind plasma entry into the magnetosphere under northward IMF conditions // J. Geophys. Res. V. 113. A04204. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA012604>
- *Němeček Z., Šafránková J., Přeč L. et al.* Structure of the outer cusp and sources of the cusp precipitation during intervals of a horizontal IMF // J. Geophys. Res. V. 108(A12). 1420. 2003. <https://doi.org/10.1029/2003JA009916>
- *Newell P.T., Meng C.-I., Sibeck D.G., Lepping R.* Some low altitude cusp dependencies on the interplanetary mag-

- netic field // *J. Geophys. Res.* V. 94. P. 8921–8927. 1989.
<https://doi.org/10.1029/JA094iA07p08921>
- *Phan T.D., Gosling J.T., Paschmann G., Pasma C., Drake J.F., Øieroset M., Larson D., Lin R.P., Davis M.S.* The dependence of magnetic reconnection on plasma β and magnetic shear evidence from solar wind observation // *Astrophys J. Lett.* 719:L199–L203. 2010.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/719/2/L199>
- *Pilipenko V., Belakhovsky V., Engebretson M.J., Kozlovsky A., Yeoman T.* Are dayside long-period pulsations related to the cusp? // *Ann. Geophys.* V. 33. P. 395–404. 2015.
<https://doi.org/10.5194/angeo-33-395-2015>
- *Song P., Gombosi T.I., DeZeeuw D.L., Powell K.G., Groth C.P.T.* A model of solar wind–magnetosphere–ionosphere coupling for due northward IMF // *Planet. Space Sci.* V. 48. P. 29–39. 2000.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(99\)00065-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(99)00065-3)
- *Trenchi L., Marcucci M.F., Pallochia G. et al.* Occurrence of reconnection jets at the dayside magnetopause: Double Star observations // *J. Geophys. Res.* V.113. A07S10. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012774>
- *Troitskaya V.A., Bolshakova O.V., Hessler V.B.* Irregular geomagnetic pulsations in the polar cap. Rep. Assem. IAGA. Int.Assoc. Geom. and Aeron. Rockville, Md. 1973.
- *Troitskaya V.A., Bolshakova O.V., Matveeva E.T.* Geomagnetic pulsations in the polar cap // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 32. P. 309–324. 1980.
<https://doi.org/10.5636/jgg.32.309>
- *Vennerstrom S.* Dayside magnetic ULF power at high latitudes: A possible long-term proxy for the solar wind velocity? // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A5. P. 10145–10157. 1999.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900015>
- *Walsh A.P., Haaland S., Forsyth C. et al.* Dawn–dusk asymmetries in the coupled solar wind–magnetosphere–ionosphere system: A review // *Ann. Geophys.* V. 32. P. 705–737. 2014.
<https://doi.org/10.5194/angeo-32-705-2014>
- *Zhou X.W., Russell C.T., Le G., Fuselier S.A., Scudder J.D.* Solar wind control of the polar cusp at high altitude // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A1. P. 245–251. 2000.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900412>