

УДК 550.385.4

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ИРРЕГУЛЯРНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ В УСЛОВИЯХ СПОКОЙНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

© 2016 г. Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн, И. П. Лавров

Геофизическая обсерватория “Борок” филиал Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, п. Борок (Ярославская обл.)

e-mail: knady@borok.yar.ru; klain@borok.yar.ru; lavr@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 12.11.2015 г.

Проведено исследование одновременных наблюдений высокоширотных длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне частот 2.0–6.0 мГц (*ipcl*) и возмущений магнитного поля в плазме солнечного ветра при слабой геомагнитной активности ($Kp \sim 0$). Для анализа использованы 1-с данные регистрации магнитного поля высокоширотной обсерватории Godhavn (GDH) и 1-мин данные параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) за период 2011–2013 гг. Анализировались пульсации *ipcl*, наблюдающиеся в дневные часы на фоне переориентации B_z -компоненты ММП с северного направления на южное. При этом другие параметры плазмы солнечного ветра и ММП, такие как скорость V , концентрация n , динамическое давление солнечного ветра $P = \rho V^2$ (ρ – плотность плазмы), модуль напряженности B были относительно стабильны. Исследовано влияние скорости изменения B_z -компоненты ММП на спектральный состав пульсаций *ipcl* и их интенсивность. Установлено, что в доминирующем числе случаев спектральная плотность пульсаций *ipcl* достигает максимума через ~ 10 – 20 мин после смены знака B_z -компоненты ММП. Обнаружено, что средняя частота *ipcl* (f) линейно связана со скоростью изменения B_z -компоненты ММП ($\Delta B_z / \Delta t$). Показано, что зависимость f от $\Delta B_z / \Delta t$ контролируется величиной угла $\alpha = \arctg(B_y / B_x)$, определяющего тип МГД разрыва на передней границе магнитосферы. Полученные результаты позволили предположить, что в условиях спокойной магнитосферы ($Kp \sim 0$) формирование наблюдаемого спектра *ipcl*, связанное с переориентацией B_z -компоненты ММП, обусловлено турбулентностью плазмы солнечного ветра, способствующей развитию неустойчивости токового слоя и усилению поверхностных волн на магнитопаузе.

DOI: 10.7868/S0016794016030111

1. ВВЕДЕНИЕ

Вследствие специфики строения высокоширотной магнитосферы область полярной шапки и дневного полярного каспа постоянно подвержены воздействию нестационарного солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). В связи с этим в данных областях наблюдается широкий спектр МГД волн (как регулярных, так и иррегулярных геомагнитных пульсаций) [Нишида, 1980]. В частности, к иррегулярным режимам колебаний, характерным для высокоширотной магнитосферы, относятся длиннопериодные пульсации *ipcl* (irregular pulsations continuous long period), диапазон частот которых (2.0–6.0 мГц) формально совпадает с диапазоном $Pc5$ [Troitskaya et al., 1973; Большакова и др., 1975]. Максимум их интенсивности и частоты наблюдения отмечается вблизи полуденного меридиана на широте полярного каспа. Пульсации *ipcl* наблюдаются как в спокойное, так и в магнитовозмущенное время [Большакова и Троицкая, 1977]. В условиях умеренной геомагнитной активности *ipcl* появляются в виде последовательности квазипериодических

всплесков (серий всплесков *ipcl*) [Куражковская и Клайн, 1997].

Морфологические закономерности пульсаций *ipcl* отражены во многих, как отечественных, так и зарубежных публикациях, например, [Большакова и др., 1975; Friis-Christensen et al., 1988; Dunlop et al., 1992; Куражковская и Клайн, 1997; Клейменова и др., 1998; Vennerstrom, 1999; Куражковская и Клайн, 2009, 2012; Pilipenko et al., 2015]. Наиболее детально исследованы пространственно-временные, спектральные, поляризационные, фрактальные и другие характеристики пульсаций *ipcl*, наблюдающихся в условиях умеренно-возмущенной магнитосферы ($Kp \sim 2$ – 3). Достаточно отметить здесь цикл работ по анализу серий всплесков пульсаций *ipcl* [Куражковская и Клайн, 2003, 2009, 2012 и ссылки в них]. В ряде работ проанализированы особенности пульсаций *ipcl* при высокой геомагнитной активности (во время развития геомагнитных бурь) [Куражковская и Клайн, 1995; Клейменова и др., 2000; Klain and Kurazhkovskaya, 2003]. В условиях спокойной магнитосферы иррегулярные пульсации *ipcl* практически не исследовались.

Как известно, межпланетные возмущения вносят существенные изменения, как в структуру самой магнитосферы, так и в динамику и характеристики иррегулярных геомагнитных пульсаций. Исследованию связи некоторых характеристик длиннопериодных иррегулярных пульсаций с параметрами солнечного ветра и ММП посвящены работы [Большакова и др., 1974; Большакова и Троицкая, 1982; Vennerstrom, 1999; Куражковская и Клайн, 2012]. Так, в работе [Большакова и др., 1974] экспериментально показано, что амплитуда пульсаций *ipcl* линейно связана со скоростью солнечного ветра и величиной отрицательной B_z -компоненты ММП. Согласно [Vennerstrom, 1999] влияние скорости солнечного ветра на спектральную плотность (power spectral density-*psd*) высокоширотных длиннопериодных пульсаций как в частотном диапазоне 4–8 мГц (~2–4 мин), так и в диапазоне 1.6–3.5 мГц ($T \sim 5$ –10 мин) наиболее значимо. Вместе с тем влияние B_z -компоненты ММП и ее комбинации со скоростью солнечного ветра ($V B_z$) на *psd* пульсаций двух частотных диапазонов практически отсутствует. Наши исследования [Куражковская и Клайн, 2012] показали, что при умеренной геомагнитной активности годовой вариацией амплитуды и динамикой фрактальной размерности серий всплесков *ipcl* управляет скорость солнечного ветра и магнитное давление плазмы солнечного ветра. Начало возбуждения всплесковых режимов *ipcl* определяется пороговыми значениями скорости $V \sim 320$ км/с и динамического давления солнечного ветра $P \sim 1$ нПа. Таким образом, влияние скорости солнечного ветра на интенсивность иррегулярных геомагнитных пульсаций и их спектральную плотность не вызывает сомнения. Вопрос о влиянии другого геоэффективного фактора – B_z -компоненты ММП на формирование спектра иррегулярных пульсаций пока остается открытым.

Ранее в работе [Большакова и Троицкая, 1982] было показано, что изменение направления вертикальной компоненты ММП с северного на южное способствует появлению отдельных интенсивных всплесков пульсаций *ipcl* в области дневного полярного каспа. Учитывая зависимость интенсивности пульсаций *ipcl* от скорости солнечного ветра и величины южной компоненты ММП (B_z), обнаруженную в работе [Большакова и др., 1974], авторы [Большакова и Троицкая, 1982] предположили, что процессы импульсного кратковременного пересоединения на передней границе магнитосферы могут быть ответственны за возбуждение изолированных всплесков иррегулярных пульсаций *ipcl*. Однако отсутствие данных с высоким разрешением о параметрах ММП не позволило в то время получить детальную картину формирования всплесков *ipcl* после переориентации B_z -компоненты ММП и выявить

возможное воздействие B_z на спектральный состав *ipcl*.

В рамках данной работы будет выполнено исследование одновременных наблюдений высокоширотных длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне частот 2.0–6.0 мГц (*ipcl*) и возмущений магнитного поля в плазме солнечного ветра при слабой геомагнитной активности ($K_p \sim 0$). Основная цель работы сводится к исследованию влияния изменения направления B_z -компоненты с северного на южное (при $K_p \sim 0$) на формирование частотного состава длиннопериодных пульсаций *ipcl*, а также анализ возможного механизма их генерации в условиях спокойной магнитосферы.

2. ДАННЫЕ

Для анализа особенностей пульсаций *ipcl*, наблюдаемых в условиях спокойной магнитосферы, использовалась цифровая регистрация магнитного поля в обсерватории Godhavn северного полушария (код – GDH, исправленные геомагнитные координаты $\Phi' = 78.16^\circ$; $\Lambda' = 33.81^\circ$, локальный геомагнитный полдень ~14 UT) с 1-с разрешением за период 2011–2013 гг., полученная с сайта [www.space.dtu.dk]. За этот же период анализировались одноминутные данные о параметрах плазмы солнечного ветра и ММП, представленные на сайте [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html]. Значения геомагнитных индексов K_p , AE и Dst взяты из Мирового центра данных в Киото [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html].

Как известно, спокойное состояние магнитосферы характеризуется низкими (почти нулевыми) значениями индексов геомагнитной активности, например, таких как K_p -индекс (характеризует планетарную возмущенность), индекс Dst (отражает развитие магнитных бурь и кольцевого тока) и AE -индекс (описывает суббуревую активность). За исследуемый период отбирались случаи наблюдения пульсаций *ipcl* в дневные часы (6–18 MLT), когда за сутки $\Sigma K_p \sim 0$ –5, суббуревая активность на ночной стороне магнитосферы была очень слабой ($AE < 40$ нТл) и отсутствовали магнитные бури (величина модуля Dst индекса не превышала 25 нТл). Необходимо отметить, что магнитосфера относительно редко бывает спокойной, когда $\Sigma K_p \sim 0$ –5 (за текущие сутки) и $AE < 40$ нТл. Тем не менее, по имеющимся в нашем распоряжении данным для дальнейшего анализа было отобрано 34 случая наблюдения пульсаций *ipcl* в условиях спокойной магнитосферы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Исходные данные регистрация магнитного поля в обсерватории Godhavn предварительно фильтровались в диапазоне частот 2.0–6.0 мГц.

Для исследования отбирались случаи пульсаций *ipcl*, которые наблюдались в дневном секторе магнитосферы, т.е. в интервале времени ± 5 ч от полуденного меридиана (07–17 MLT). Выбор данного временного интервала связан с тем, что именно вблизи полудня в области полярного каспа и шапки, по обыкновению, наблюдается типичный интенсивный режим пульсаций *ipcl* [Большакова и Троицкая, 1977]. Необходимо отметить, что положение обсерватории Godhavn (северное полушарие) в околораздненном секторе таково, что в условиях спокойной магнитосферы оно совпадает со среднестатистическим положением дневного полярного каспа [Newell and Meng, 1988; Zhou et al., 2000]. Таким образом, мы будем анализировать пульсации *ipcl*, наблюдаемые в дневные часы при спокойных геомагнитных условиях вблизи проекции каспа на земную поверхность.

После фильтрации записей магнитного поля проводился спектрально-временной анализ пульсаций *ipcl* в выбранные интервалы времени. На рисунке 1а представлен типичный пример отфильтрованных в полосе частот 2.0–6.0 мГц геомагнитных пульсаций *ipcl* (H – компонента) в GDH (30.01.2013) во время магнитоспокойного периода и их динамический спектр (рис. 1б). Как правило, режим пульсаций *ipcl* характеризовался изменяющимся спектральным составом.

Далее проводилось сопоставление случаев наблюдения пульсаций *ipcl* и параметров межпланетной среды. Анализ одноминутных данных о параметрах плазмы солнечного ветра и ММП (скорости V , концентрации n , динамического давления солнечного ветра $P = \rho V^2$ (ρ – плотность плазмы), модуля напряженности B ММП, V_x -, V_y - и V_z -компонент ММП) показал, что во время наблюдения пульсаций *ipcl* все параметры за исключением V_z -компоненты ММП оставались практически стабильными. Интенсификация колебаний *ipcl* происходила на фоне флуктуаций V_z -компоненты ММП, которая при нахождении обсерватории GDH в дневном секторе многократно изменяла свой знак с плюса на минус и наоборот. На рисунке 1в показано типичное поведение V_z -компоненты ММП во время наблюдения пульсаций *ipcl* 30.01.2013 в GDH. Здесь же дана сглаженная сплайн – аппроксимацией вариация V_z -компоненты ММП (рис. 1з).

В данной работе мы ограничились анализом интервалов наблюдения пульсаций *ipcl* вблизи смены знака V_z -компоненты ММП с плюса на минус. Как известно, поворот вертикальной компоненты ММП к югу является одним из наиболее геоэффективных факторов, оказывающих существенное влияние на волновые процессы в магнитосфере. Рисунок 1 наглядно демонстрирует пример наблюдения пульсаций *ipcl* в GDH на фоне изменения направления V_z -компоненты ММП с

северного на южное направление. Во всех анализируемых случаях после переориентации V_z отмечалось усиление интенсивности пульсаций *ipcl* в GDH.

3.2. Подтверждением того, что пульсации *ipcl* наблюдались на фоне относительно стабильных параметров межпланетной среды (V_x -, V_y -компонент ММП, B ММП, n , V , P) является их усредненная динамика (рис. 2). Одноминутные данные о параметрах солнечного ветра и ММП обрабатывались методом наложения эпох. За реперную точку принимался момент перехода V_z -компоненты ММП через ноль. Все параметры анализировались в течение 2-х ч до момента смены ориентации вертикальной компоненты ММП с северного на южное и в течение 2-х часов после. Видно, что V_x - и V_y -компоненты ММП сохраняли положительное и отрицательное направление, соответственно. В их динамике не отмечалось резких флуктуаций и смены знака. Другие параметры соответствовали условиям спокойной геомагнитной обстановки и в среднем составляли $B \sim 2.8$ нТл, $n \sim 4.4$ см⁻³, $V \sim 325$ км/с, $P \sim 0.96$ нПа. В поведении этих параметров отсутствовали резкие скачки и существенные флуктуации, которые могли бы способствовать активизации пульсаций *ipcl*. Данные, представленные на рис. 2, позволяют прийти к заключению, что при спокойной геомагнитной активности из всех анализируемых параметров солнечного ветра и ММП только переориентация V_z -компоненты может быть одним из главных факторов, способных влиять на характеристики пульсаций *ipcl*.

3.3. Рассмотрим, как изменение направления V_z -компоненты с положительного на отрицательное направление влияет на формирование режима пульсаций *ipcl*. Прежде всего, заметим, что после изменения знака V_z -компоненты ММП максимум интенсивности пульсаций достигается не мгновенно, а через некоторое время. На рисунке 3 приведена гистограмма распределения времени сдвига τ между временем достижения максимума спектральной плотности (Spectral Density-SD) пульсаций *ipcl*, наблюдаемых в GDH, и моментом перехода V_z -компоненты через ноль ($\tau = \tau_{\max SD} - \tau_{V_z=0}$). По всем рассмотренным случаям величина сдвига была положительной и изменялась в пределах от 4 до 60 мин. В доминирующем числе время сдвига составляло 10–20 мин.

3.4. Длиннопериодные иррегулярные пульсации *ipcl* наблюдаются в широком диапазоне частот. Оценить частоту подобных хаотических режимов чрезвычайно трудно. Анализ динамических спектров пульсаций *ipcl*, наблюдающихся при слабой геомагнитной активности, показал, что спектральный максимум принадлежал в основном диапазону частот 2.1–3.6 мГц. Характеристикой спектрального состава *ipcl* служила сред-

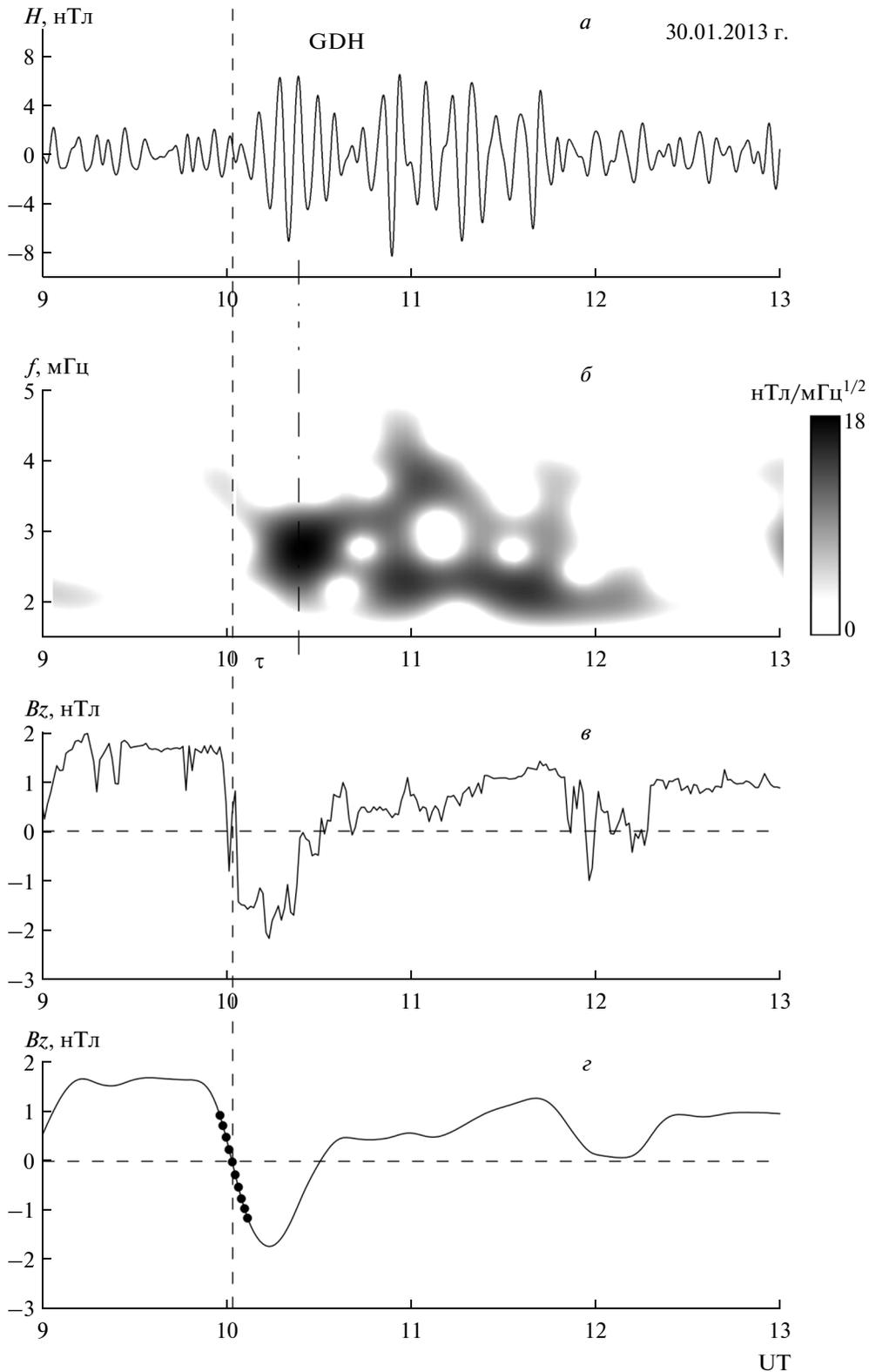


Рис. 1. Пример наблюдения длиннопериодных иррегулярных пульсаций *ipcl* (*a*) в обсерватории Godhavn (H -компонента) 30.01.2013 г. и их динамический спектр (*б*). Ниже приведена вариация V_z -компоненты ММП (*в*) и ее сплайн-аппроксимация (*г*). Черными кружками показан временной интервал, на котором определялась скорость изменения V_z -компоненты. Вертикальная штриховая линия показывает момент перехода V_z -компоненты через ноль, а штрихпунктирная линия обозначает момент достижения максимума спектральной плотности пульсаций.

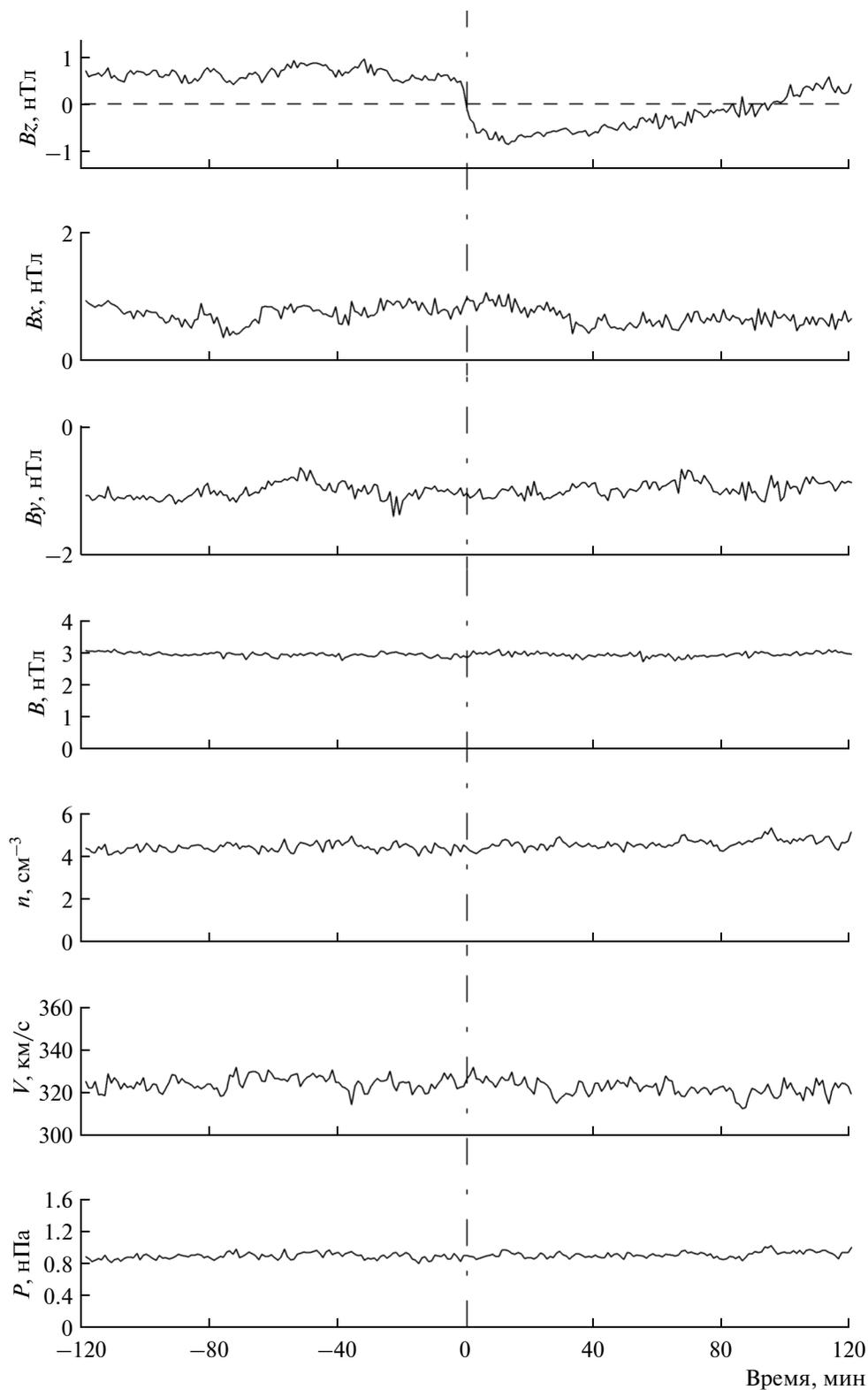


Рис. 2. Динамика параметров (B_z -, B_x -, B_y -компонент, модуля B) ММП и плазмы солнечного ветра (концентрации n , скорости V , динамического давления P), полученная методом наложенных эпох для всех случаев наблюдения пульсаций $ipcl$ в GDH.

няя частота пульсаций (f), которая оценивалась по динамическим спектрам. Для этого анализировалась матрица спектральных плотностей, которая строилась по исходной реализации. Далее находилась максимум спектральной плотности и частота, которая ему соответствует. Средняя частота пульсаций $ipcl$ оценивалась на временном интервале, равном ~ 60 мин после перехода B_z -компоненты чрез нулевое значение. В качестве характеристики B_z -компоненты ММП рассматривалась скорость ее изменения, т.е. производная от B_z ($\Delta B_z/\Delta t$, где $\Delta t = 1$ мин). Скорость изменения B_z -компоненты ММП определялась на линейном участке вариации B_z вблизи перехода через ноль. На рисунке 1г точками обозначен участок вариации B_z -компоненты, по которому рассчитывалась $\Delta B_z/\Delta t$.

На рисунке 4 представлена связь средней частоты (f) пульсаций $ipcl$ со скоростью изменения B_z -компоненты ($\Delta B_z/\Delta t$), полученная по всем анализируемым случаям. Для данной зависимости характерна тенденция уменьшения частоты пульсаций $ipcl$ с увеличением скорости изменения B_z -компоненты. Полученное множество точек естественным образом разбилось на две группы, каждая из которых хорошо аппроксимируется линейной функцией. Мы условно их обозначили L1 и L2. Для обеих групп пульсаций $ipcl$ получены уравнения регрессии, имеющие вид:

$$f = -6.93\Delta B_z/\Delta t + 3.61 \text{ (L1)},$$

$$f = -2.98\Delta B_z/\Delta t + 2.39 \text{ (L2)}.$$

Коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и аппроксимирующими прямыми составили 0.96 и 0.57 для L1 и L2, соответственно. Относительно высокие коэффициенты корреляции свидетельствуют о тесной связи между средней частотой пульсаций $ipcl$ и скоростью изменения B_z -компоненты ММП и позволяют утверждать, что зависимость f от $\Delta B_z/\Delta t$ не является случайной.

3.5. Анализ параметров солнечного ветра и ММП методом наложения эпох для двух групп пульсаций $ipcl$ показал, что группы L1 и L2 наблюдаются при схожей динамике практически всех параметров межпланетной среды. Вместе с тем обнаружилась тенденция различного поведения V_x - и V_y -компонент как до переориентации B_z -компоненты, так и после во время наблюдения пульсаций L1 и L2. Для более наглядного представления обнаруженного различия в динамике V_x - и V_y -компонент мы рассмотрели угол $\alpha = \arctg(V_y/V_x)$. Угол α отсчитывался от линии Солнце–Земля к отрицательному направлению V_y -компоненты ММП в плоскости эклиптики. На рисунке 5 показана усредненная вариация угла $\alpha = \arctg(V_y/V_x)$. Репером так же, как и на рис. 2, служил момент перехода B_z -компоненты ММП через ноль. До реперной точки величины

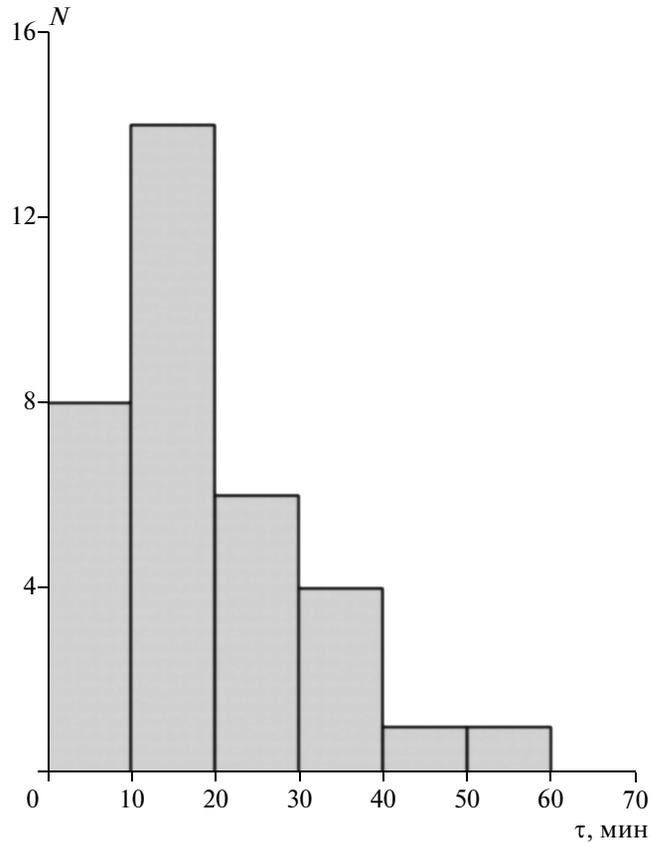


Рис. 3. Распределение времени сдвига (τ) между максимумом спектральной плотности пульсаций $ipcl$ и моментом перехода B_z -компоненты ММП через ноль.

углов α , соответствующие группам L1 и L2 пульсаций $ipcl$, примерно совпадают и составляют $\sim 50^\circ\text{--}55^\circ$. После момента переориентации B_z -компоненты ММП для режима пульсаций L1 характерен поворот угла $\alpha \sim$ от 55° до 80° . Это означает, что проекция вектора напряженности V на плоскость эклиптики становится практически перпендикулярной к линии Солнце–Земля. Для случаев группы пульсаций $ipcl$ L2 видна тенденция уменьшения угла α от 50° до 18° , что соответствует приближению проекции вектора напряженности V на плоскость эклиптики к линии Солнце–Земля. Таким образом, в условиях спокойной магнитосферы на процесс формирования двух групп пульсаций $ipcl$ и, соответственно, на возникновение двух линейных зависимостей частоты пульсаций от $\Delta B_z/\Delta t$ может оказывать влияние разный характер поведения проекции вектора ММП в плоскости эклиптики.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе предпринята попытка выявить факторы, влияющие на развитие высокоширотных длиннопериодных иррегулярных пульсаций $ipcl$ в условиях экстремально спо-

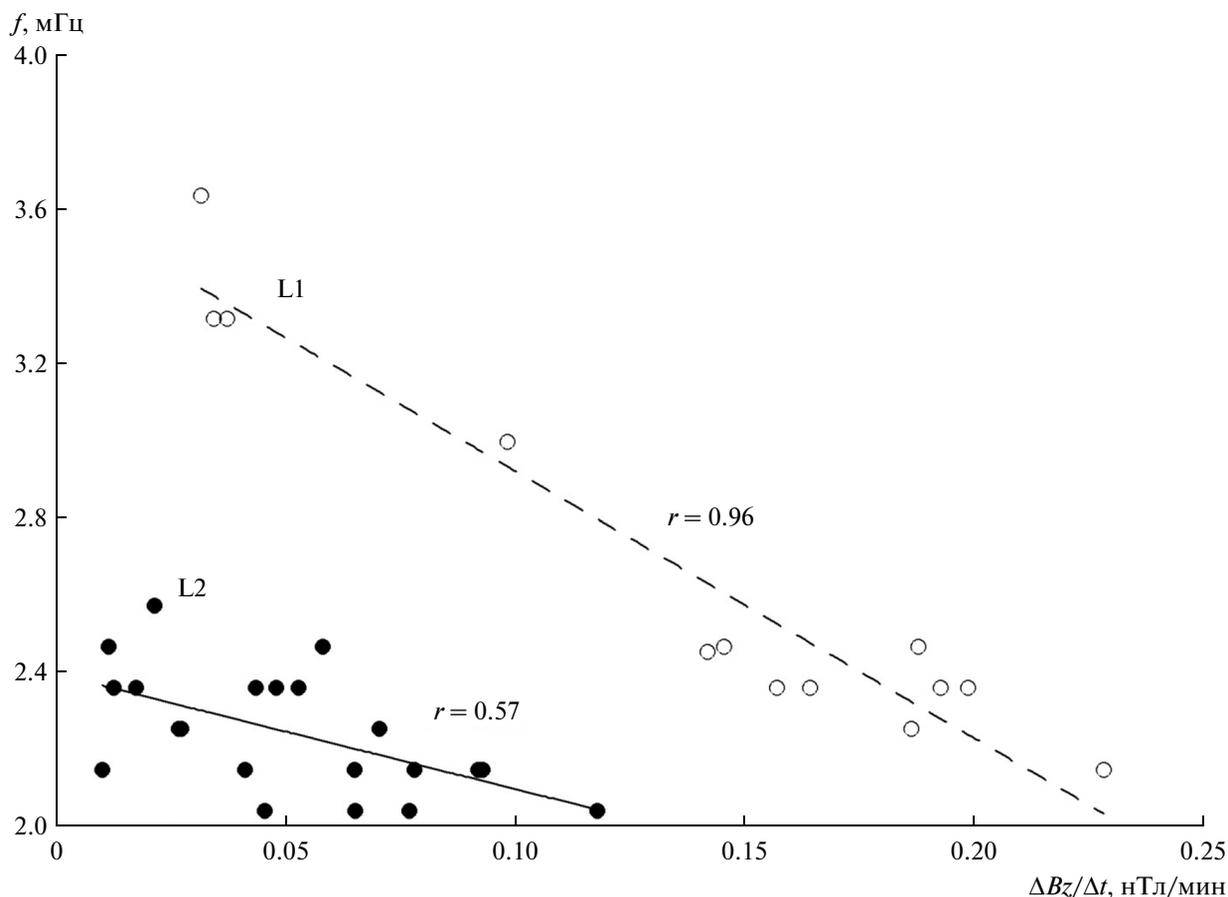


Рис. 4. Зависимость средней частоты (f) пульсаций $ipcl$ от скорости изменения B_z -компоненты ММП ($\Delta B_z/\Delta t$) и ее аппроксимация линейной функцией (прямые L1 и L2).

койной магнитосферы, когда суммарное значение K_p индекса за текущие сутки не превышало $\sim 0-5$, $AE < 40$ нТл и модуль Dst индекса составлял не более 25 нТл. Такое состояние планетарной и авроральной активности, а также мощности кольцевого тока соответствовало относительно стабильным параметрам плазмы солнечного ветра и ММП – скорости V , концентрации n , динамическому давлению солнечного ветра P , модулю напряженности B (рис. 2). При таких характеристиках межпланетных условий наиболее геоэффективным параметром была ориентация вектора напряженности B и, в частности, B_z -компонента ММП, в поведении которой отмечались значительные вариации. Смена направления B_z -компоненты с северного на южное приводит к интенсификации пульсаций $ipcl$. Их спектральная плотность достигает максимума не мгновенно, а через 10–20 мин после перехода B_z -компоненты через ноль. Кроме того, переориентация B_z -компоненты ММП оказывает влияние на формирующийся спектр пульсаций.

В настоящее время существуют различные точки зрения на природу длиннопериодных ирре-

гулярных пульсаций $ipcl$. В условиях умеренно-возмущенной магнитосферы механизмом генерации всплесковых режимов $ipcl$ является механизм, аналогичный ветровой неустойчивости в гидродинамике (механизм Майлса–Филлипса) [Куражковская и Клайн, 2012]. Для развития неустойчивости Майлса–Филлипса на магнитопаузе характерны те же закономерности, что и для условий генерации всплесковых режимов $ipcl$, а именно турбулентность, пороговое значение скорости и флуктуации магнитного давления. Во время возмущенных периодов (геомагнитные бури) пульсации $ipcl$ являются следствием суперпозиции волн из различных источников, например, пересоединение силовых линий ММП и геомагнитного поля, импульсы динамического давления солнечного ветра и другие [Клейменова и др., 1998].

На наш взгляд, при спокойной геомагнитной активности и относительно стабильных параметрах межпланетной среды сценарий интенсификации пульсаций $ipcl$ выглядит следующим образом. После переориентации B_z -компоненты ММП в области передней границы магнитосферы возни-

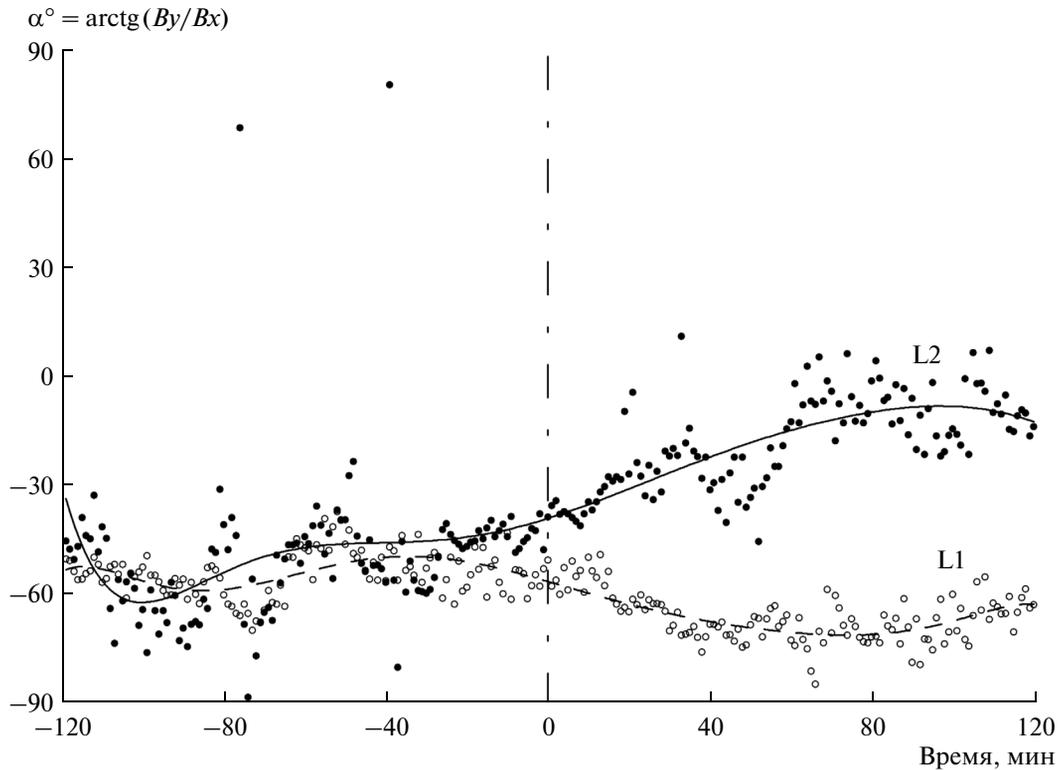


Рис. 5. Усредненная динамика угла $\alpha = \arctg(B_y/B_z)$ для случаев пульсаций *ipcl* группы L1 (светлые точки) и L2 (темные точки) наблюдения пульсаций *ipcl*. Аппроксимация экспериментальных данных ортогональными полиномами показана пунктирной (L1) и сплошной (L2) линиями.

кает токовый слой, неустойчивость которого приводит к активизации режима пульсаций *ipcl*. Как видно из рис. 4 зависимость средней частоты генерируемых пульсаций *ipcl* от скорости изменения B_z -компоненты ММП естественным образом распалась на два кластера (L1 и L2). Разделение экспериментально полученной зависимости f от $\Delta B_z/\Delta t$ на два кластера, видимо, определяется поведением угла $\alpha = \arctg(B_y/B_x)$, показывающего отклонение проекции вектора напряженности B в плоскости эклиптики от линии Солнце–Земля в сторону отрицательной B_y -компоненты ММП (рис. 5). Множество точек первого кластера (L1) соответствует углу $\alpha \sim 90^\circ$ в плоскости эклиптики, т.е. проекция вектора напряженности B на плоскость эклиптики стремится быть перпендикулярной линии Солнце–Земля. Для точек второго кластера характерен угол α , стремящийся к 0° при одновременной смене знака B_z -компоненты, т.е. проекция вектора напряженности ММП на плоскость эклиптики совпадает с линией Солнце–Земля (рис. 5). Учитывая стабильность параметров B , n , V и P , можно предположить, что в первом случае на передней границе магнитосферы возникает вращательный разрыв, второй случай соответствует тангенциальному разрыву [Ландау и Лифшиц, 1992]. Однозначно ответить на вопрос, какой именно механизм приводит к потере устой-

чивости токового слоя, исходя из полученных результатов, не представляется возможным.

Поскольку, даже при $K_p \sim 0$ наблюдается перероентация B_z -компоненты ММП, можно было бы предположить, что именно пересоединение силовых линий ММП и геомагнитного поля ответственно за развитие пульсаций *ipcl*, как это ранее рассматривалось в работе [Большакова и Троицкая, 1982]. Однако время τ нарастания спектральной плотности пульсаций *ipcl* существенно выше, чем характерные времена импульсного пересоединения (Flux Transfer Events – FTE), составляющие $\sim 2\text{--}3.5$ мин [Trattner et al., 2015]. Кроме того, в результате быстрого пересоединения возникают ударные волны, следствием которых являются импульсы [Вайнштейн и др., 1989], классические проявления которых по спутниковым и наземным наблюдениям приводятся в литературе, например, [Lanzerotti and MacLennan, 1988; Korotova et al., 2012]. Однако при анализе наземных наблюдений пульсаций *ipcl* мы не обнаружили присутствия импульсов как во время перероентации B_z -компоненты ММП, так и после. Таким образом, известные модели быстрого пересоединения не подходят для интерпретации полученных нами экспериментальных данных. С

нашей точки зрения, скорее всего, реализуется модель Паркера-Свита [Вайнштейн и др., 1989].

Следует также подчеркнуть, что почти все известные механизмы предполагают, что пересоединяющиеся поля стационарны [Вайнштейн и др., 1989]. В нашем случае это условие не выполняется, т.к. генерация колебаний *ipcl* наблюдается при $\frac{\partial B_z}{\partial t} \neq 0$. Согласно работам [Somov, 2006; Леденцов и Сомов, 2015] спектр колебаний, возникающих на границе магнитопаузы, должен определяться нестационарностью магнитного поля. Следовательно, в силу того, что B_z -компонента ММП изменяет знак, можно говорить, что магнитное натяжение силовых линий в подсолнечной области магнитосферы стремится к нулю [Паркер, 1982]. Таким образом, усиление турбулентности плазмы солнечного ветра, связанное с переориентацией B_z -компоненты ММП, приводит к неустойчивости токового слоя, что способствует интенсификации поверхностных волн на магнитопаузе и, как следствие, к формированию наблюдаемого спектра иррегулярных пульсаций *ipcl*.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что при слабой геомагнитной активности ($K_p \sim 0$) высокоширотные иррегулярные пульсации *ipcl* наблюдаются на фоне переориентации B_z -компоненты ММП с северного направления на южное при практически стабильных других параметрах плазмы солнечного ветра и ММП. Изменение знака B_z -компоненты ММП способствует усилению интенсивности пульсаций *ipcl*. Их спектральная плотность в доминирующем числе случаев достигает максимума через ~ 10 – 20 мин после перехода B_z -компоненты ММП через ноль. Нарастание скорости изменения B_z -компоненты ММП ($\Delta B_z / \Delta t$) приводит к уменьшению средней частоты (f) пульсаций *ipcl*. Показано, что линейная зависимость f от $\Delta B_z / \Delta t$ контролируется величиной угла $\alpha = \arctg(B_y / B_x)$, определяющего тип МГД разрыва на передней границе магнитосферы. В условиях спокойной магнитосферы ($K_p \sim 0$) возможным источником пульсаций *ipcl* является связанная с переориентацией B_z -компоненты ММП неустойчивость токового слоя, способствующая усилению поверхностных волн на магнитопаузе.

Авторы благодарят Jurgen Matzka (Technical University of Denmark National Space Institute) за предоставленную возможность использования геомагнитных данных обсерватории Godhavn (Greenland west chain). Авторы также благодарят создателей базы данных OMNI и Word Data Centre for Geomagnetism (Kyoto) за возможность использования в исследованиях параметров солнечного ветра, ММП и данных K_p , AE и Dst индексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Большакова О.В., Меньшутин И.Н., Пудовкин М.И.* Связь высокоширотных дневных пульсаций геомагнитного поля ($T = 5$ – 10 мин) с параметрами солнечного ветра // Антарктика. Вып. 13. С. 5–11. 1974.
- *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.* Динамика дневного каспа по наблюдениям длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 17. № 6. С. 1076–1082. 1977.
- *Большакова О.В., Троицкая В.А.* Импульсное пересоединение как возможный источник пульсаций типа *ipcl* // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 22. № 5. С. 877–879. 1982.
- *Вайнштейн С.И., Быков А.М., Топтыгин И.Н.* Турбулентность, токовые слои и ударные волны. М.: Наука, 311 с. 1989.
- *Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли Ж., Биттерли М.* Длиннопериодные ($T = 8$ – 10 мин) геомагнитные пульсации в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 4. С. 38–48. 1998.
- *Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли М., Шотт Ж.-Ж.* Длиннопериодные (1–6 мГц) геомагнитные пульсации в начальную фазу большой магнитной бури 21 февраля 1994 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 4. С. 16–25. 2000.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Динамика длиннопериодных иррегулярных пульсаций высоких широт в период сильных магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 6. С. 53–59. 1995.
- *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.* Спектральные и поляризационные особенности серий всплесков пульсаций *ipcl* // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 3. С. 351–360. 2003.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Всплесковые режимы длиннопериодных иррегулярных пульсаций в диапазоне частот 2.0–6.0 мГц и суббуревая активность на ночной стороне магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 4. С. 483–493. 2009.
- *Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Влияние параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на формирование всплесковых режимов длиннопериодных иррегулярных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 4. С. 482–493. 2012.
- *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 661 с. 1992.
- *Леденцов Л.С., Сомов Б.В.* Магнитные течения плазмы в магнитной гидродинамике и физике магнитного пересоединения // УФН. Т. 185. № 2. С. 113–142. 2015.

- *Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 299 с. 1980.
- *Паркер Е.* Космические магнитные поля. Т. 1. М.: Мир, 608 с. 1982.
- *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 Research 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.
- *Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A.* Fractal dynamics of the long-period irregular pulsations at the initial phase of a magnetic storm // *Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy*. Publ. AGU. V. 4. № 2. P. 133–139. 2003.
- *Korotova G.I., Sibeck D.G., Petrov V.I.* Interball-1 observations of flux transfer events // *Ann. Geophysicae*. V. 30. P. 1451–1462. 2012. doi: 10.5194/angeo-30-1451-2012.
- *Lanzerotti L.J., MacLennan C.G.* Hydromagnetic waves associated with possible flux transfer events // *Astrophysics and Space Science*. V. 144. P. 279–290. 1988.
- *Newell P.T., Meng C.I.* The cusp and the cleft/boundary layer: low-altitude identification and statistical local time variation // *J. Geophys. Res.* V. 93. № A12. P. 14549–14556. 1988.
- *Pilipenko V., Belakhovsky V., Engebretson M.J., Kozlovsky A., Yeoman T.* Are dayside long-period pulsations related to the cusp? // *Ann. Geophysicae*. V. 33. P. 395–404. 2015. doi: 10.5194/angeo-33-395-2015.
- *Somov B.V.* Plasma Astrophysics. Part II. Reconnection and Flares. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 413 с. 2006.
- *Trattner K.J., Onsager T.G., Petrinec S.M., Fuselier S.A.* Distinguishing between pulsed and continuous reconnection at the dayside magnetopause // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 120. P. 1684–1696. 2015. doi:10.1002/2014JA020713.
- *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.
- *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.
- *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.