

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.025

АЛЬФА ЧАСТИЦЫ КАК ВАЖНЫЙ ИНДИКАТОР ПРОХОЖДЕНИЯ ДИАМАГНИТНЫХ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВНУТРЬ МАГНИТОСФЕРЫ

В.Г. Еселевич¹, В.А. Пархомов²

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia; e-mail: esel@iszf.irk.ru

²Baikal State University, Irkutsk, Russia; e-mail: pekines_41@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований, показывающие наличие одновременных скачков концентрации протонов $(N_2/N_1)_p$ и альфа-частиц $(N_2/N_1)_\alpha$ на границах диамагнитных структур (ДС) различных масштабов как в квазистационарном медленном, так и в спорадическом солнечном ветре (СВ).

Введение

Известно, что диамагнитные структуры (ДС) потоков солнечного ветра (СВ) различного типа определяются по антикорреляции скачкообразного возрастания концентрации протонов $(N_2/N_1)_p$ и скачкообразного падения модуля магнитного поля (B_2/B_1) на границах этих ДС [Еселевич, 2019]. При этом, существуют ДС, связанные как с квазистационарным медленным СВ (максимальная скорость которого на 1 а.е. $V_{\max} < 450$ км/с), так и со спорадическим СВ, вызванным корональными выбросами массы (КВМ), возникающими вблизи поверхности Солнца [Parkhomov et al., 2018]. Кроме протонов, второй основной компонентой ионного состава СВ являются дважды ионизированные ионы гелия, т.е. He⁺⁺ или α -частицы [Веселовский и Ермолаев, 2008].

Первые исследования поведения ионов He⁺⁺ на фронте ударной волны были выполнены еще в работе [Gosling et al., 1978]. После этого данный вопрос исследовался как по экспериментальным данным, так и методом моделирования [Scholer and Terasawa, 1990; Scholer, 1990; Trattner and Scholer, 1991].

Согласно [Сапунова и др., 2020] относительное среднее содержание альфа-частиц в невозмущенном солнечном ветре на орбите Земли составляет $Na/Np \approx 7\%$. Причем, за фронтом межпланетной ударной волны (МУВ) величина Na/Np , также, близка к этому значению. В статье [Sapunova et al., 2022] детально исследована зависимость Na/Np от скачка различных параметров на фронте МУВ и головной околоземной ударной волны.

До сих пор вопрос о наличии и роли альфа частиц в структуре ДС не рассматривался, хотя он может оказаться важным при анализе взаимодействия ДС с магнитосферой Земли. И, в частности, при исследовании возможности импульсного проникновения вещества ДС внутрь магнитосферы [Echim and Lemaire, 2000].

В связи с этим, рассмотрим вариации концентрации альфа частиц на границе ДС потоков различного типа СВ в сравнении с вариацией концентрации протонов.

Анализ наличия альфа частиц и соотношение их концентраций с протонами в ДС продемонстрируем на примере двух характерных типов потоков СВ и на фронтах МУВ:

- 1) Типичного медленного СВ, а точнее области CIR (corotating interaction region) или области взаимодействия медленного и быстрого СВ 24.04.2013 (00:14UT)
- 2) Типичного спорадического потока СВ, связанного с межпланетным КВМ относительно малых размеров 28.06.1999 (02:07UT).

1. Данные и методы анализа

Для решения поставленной задачи использовались:

а) Синоптические карты кэррингтоновских оборотов для магнитного поля Солнца, рассчитанного в потенциальном приближении [<http://wso.stanford.edu/>].

б) Временные зависимости параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), полученные по данным OMNI [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>].

в) Модуль B ММП, концентрация протонов и концентрация альфа частиц в зависимости от времени по данным спутника Wind с разрешением 3 секунды также по данным OMNI. Для отождествления структур на Солнце и особенностей СВ на орбите Земли использовались методы нахождения их соответствия, изложенные в статьях [Еселевич М. и В., 2006; Еселевич М. и В., 2006a].

2. ДС медленного СВ на 1 а.е. 24.04.2013

Начнем анализ ДС со случая медленного СВ 24.04.2013. Проявление этого события на 1 а.е. выделено на Рис. 1 (1-5) красным прямоугольником и определяется следующими особенностями СВ [Еселевич М. и В., 2006b; Borrini et al., 1981]:

- а) повышенной концентрацией плазмы $N > 10 \pm 2 \text{ см}^{-3}$ (Рис. 1 (4)),
- б) невысокой скоростью СВ $V \approx 290\text{--}350 \text{ км/с}$ (Рис. 1 (5)) и
- в) наличием в его пределах секторной границы ММП, на которой происходит изменение азимутального угла Φ на $\sim 180^\circ$ (от $\sim 140^\circ$ до $\sim 320^\circ$), т. е. знак ММП меняется от «+» (направление от Солнца) к «-» (к Солнцу) (Рис. 1 (2)).

Этот участок называется ГПС – гелиосферный плазменный слой, а его часть с максимальной концентрацией обозначается, как CIR (corotating interaction region – область взаимодействия медленного и быстрого СВ). Эта область выделена синим прямоугольником на Рис. 1 (1-5). На 1 а.е. источником на Солнце этого участка ГПС должен быть участок пересечения пояса стримеров с эклиптической (на Рис. 1 (6) показан кружком) в ближайший момент времени $t_0 \approx 18.04.2013$ (00:04 UT), когда он вследствие вращения Солнца пересекает центральный меридиан. Положение пояса стримеров на синоптической карте (Рис. 1 (6)) показано жирными кривыми, соответствующими положению нейтральной линии (НЛ) глобального магнитного поля, разделяющей положительную (сплошные кривые) и отрицательную (пунктир) полярности поля. НЛ проходит вдоль вершин арок магнитного поля, являющимися основанием пояса стримеров вблизи поверхности Солнца. Справа на Рис. 1 (6) отмечен угол λ наклона пояса стримеров (а значит и ГПС) к плоскости эклиптики, величина которого больше 10° . Таким образом, в данном случае по определению [Еселевич М. и В., 2006а] имеет место наклонный пояс стримеров. Оценим время t_E прихода на орбиту Земли участка пояса, выделенного на Рис. 1 (6) кружком в момент $t_0 \approx 18.04.2013$ (00:04 UT), по формуле [Еселевич М. и В., 2006а]:

$$t_E \approx t_0 + 4.6 \cdot 10^4 / V (\text{км/с}), \text{ часов,}$$

где $t_0 \approx$ ((00:04 UT) 18.04.2013), V — скорость медленного СВ на 1 а.е. (км/с).

Полагая, согласно Рис. 1 (5), $V \approx 310 \text{ км/с}$, получаем $t_E \approx 18.04.2013$ (04:00 UT) + 6 суток 4 часа $\approx 24.04.2013$ (08:00 UT). На Рис. 1 (2) расчетный момент показан вертикальной жирной стрелкой. На рисунке видно, что с точностью ≈ 15 минут расчетное время согласуется с наблюдаемым моментом $\approx 23.04.2013$ (43:00 UT) прихода участка пояса стримеров на 1 а.е. в виде секторной границы ММП: знак ММП изменяется от «+» к «-». Соответствие участка НЛ на Солнце, выделенного кружком на Рис. 1 (6) и секторной границы на 1 а.е. на Рис. 1 (2), показано двумя длинными пересекающимися красными прямыми со стрелкой на одном из концов.

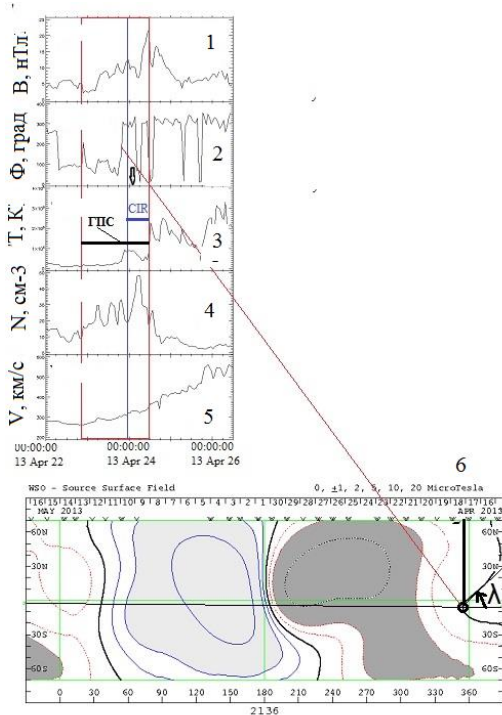


Рисунок 1.

Параметры ММП и плазмы СВ в зависимости от времени. Панель (а.):

1. модуль В ММП,
2. азимутальный угол Φ ММП,
3. температура плазмы СВ,
4. концентрация плазмы СВ,
5. скорость СВ. Участок пояса стримеров на орбите Земли или ГПС выделен красным прямоугольником. Участок CIR – синим прямоугольником. Получено по данным OMNI [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>],
6. Синоптическая карта кэррингтоновского оборота CR 2136 для магнитного поля Солнца, рассчитанного в потенциальном приближении [<http://wso.stanford.edu/>]: сплошные кривые – положительная полярность, пунктир – отрицательная полярность, жирные кривые – нейтральная линия (НЛ) глобального магнитного поля Солнца.

На Рис. 2 *n.1, 2* по антикорреляции ($r_{(N,B)} \sim -0.9$) временных профилей модуля ММП и концентрации протонов N_p плазмы СВ по данным спутника Wind видно, что область CIR представляет собой последовательность ДС (выделенных вертикальными пунктирами), внутри каждой из которых наблюдаются микро ДС различных меньших масштабов. Эти ДС характеризуются не только скачкообразным ростом N_p , но и скачками концентрации альфа частиц N_α (Рис. 2 *n.3*). Для выделенной микро ДС на увеличенном временном масштабе в интервале $\approx 07:19 - 07:27 \text{ UT}$ представлены профили концентрации протонов и концентрации альфа частиц, соответственно, на Рис. 2 *n.4, 5*. Из них следует, что, не смотря на достаточно высокий уровень шумовых колебаний на профилях $N_\alpha(t)$, существует высокий уровень отрицательной

корреляции с модулем ММП ($r_{N_p, B} = -0.8$, $r_{N_\alpha, B} = -0.53$) внутри микроструктуры вплоть до самых малых периодов (соответственно, пространственных масштабов) N_p и N_α , коэффициент корреляции между которыми равен $r_{(N_p, N_\alpha)} = 0.54$. Эти соответствия показаны на Рис. 2 п.4, 5 вертикальными пунктирными прямыми.

Для дальнейшего исследования динамики вариаций N_p и N_α на границах микро ДС различных масштабов введем понятие относительных скачков концентрации протонов $N_{p2}/N_{p1} = (N_2/N_1)_p$ и альфа частиц $(N_{\alpha2}/N_{\alpha1}) = (N_2/N_1)_\alpha$. Определение значений N_{p1} и $N_{\alpha1}$ перед границей микро ДС и непосредственно за ней N_{p2} и $N_{\alpha2}$ показаны справа на Рис. 2 п.4, 5 стрелками.

На основе приведённых данных было сделано заключение, что для ДС квазистационарного медленного СВ, связанных с поясом или цепочками стримеров, в рамках рассмотренной в статье методики, имеет место линейная зависимость $(N_2/N_1)_\alpha$ от $(N_2/N_1)_p$.

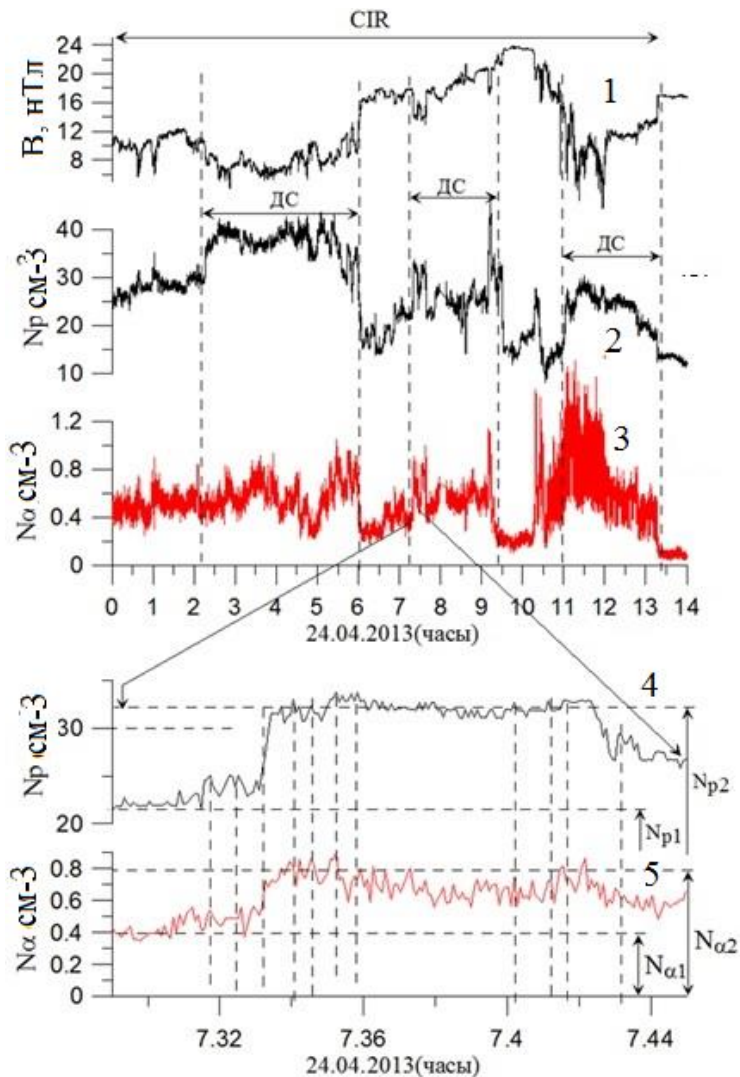


Рисунок 2.
Модуль B ММП и параметры плазмы СВ в зависимости от времени в области CIR по данным спутника Wind [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>] 24.04.2013 г.
1. модуль B ММП,
2. концентрация протонов N_p ,
3. концентрация альфа частиц N_α . На увеличенном временном масштабе в интервале $\approx 07:19 - 07:27$ UT,
4. профили концентрация протонов, N_{p1} , N_{p2}
5. вариации концентрация альфа частиц, $N_{\alpha1}$, $N_{\alpha2}$.

3. ДС 28.06.1999 спорадического СВ на орбите Земли

Рассмотрим особенности зависимости $(N_2/N_1)_\alpha$ от $(N_2/N_1)_p$ для спорадического потока СВ 28.06.1999. В этом событии подробно исследовалась наиболее плотная часть ДС [Пархомов и др., 2017], а именно волокно с уникально большой скоростью (около 900 км/с). Было показано, что данное волокно является частью специфического спорадического потока солнечного ветра (СВ), который можно рассматривать как межпланетный транзит малых размеров. Нас этот случай спорадического СВ будет интересовать: во-первых, как пример полного набора последовательности ДС различных масштабов, содержащихся в разных частях ICME, начиная с участка ударно-нагревой плазмы и далее межпланетного транзита малых размеров, включающего в себя плотное волокно; во-вторых, для сравнения временных профилей концентрации альфа частиц и протонов спорадического СВ с аналогичными профилями для других типов потоков СВ.

Как показано на Рис. 3 (п.1) и, было установлено ранее [Пархомов и др., 2017], этот спорадический поток СВ является последовательностью ударной волны, ударно нагретой плазмы (Sheath) и межпланетного транзита малых размеров (ICME). На Рис. 3 (п.1, 2) по антикорреляции временных профилей модуля B

ММП и концентрации протонов N_p плазмы СВ видно, что рассматриваемый спорадический СВ представляет собой последовательность ДС (выделенных вертикальными пунктирами), внутри каждой из которых имеет место набор микро ДС меньших масштабов. Наибольший скачок N_p характерен для ДС, связанной с эруптивным волокном, которое регистрируется в интервале времени $\approx 04:42 - 05:12$ UT. Как видно на Рис. 3 (n.2,3), все скачки концентрации N_p в каждой последовательности ДС сопровождаются скачками концентрации альфа частиц N_α .

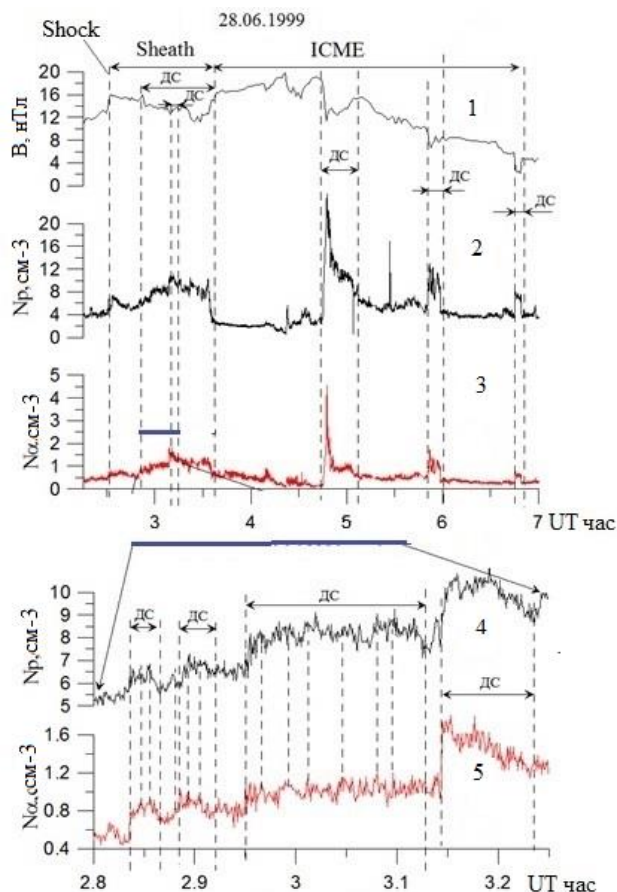


Рисунок 3. Модуль B ММП и параметры плазмы СВ в зависимости от времени для спорадического потока СВ по данным спутника Wind [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>] 28.06.1999 г.: 1. модуль B ММП, 2. концентрация протонов, 3. концентрация альфа частиц. На увеличенном временном масштабе в интервале $\approx 02:48-03:15$ UT (синяя жирная линия) профили концентрация протонов (4) и концентрация альфа частиц (5).

Для одной из последовательностей микро ДС на Рис. 3 (n.4) на увеличенном временном масштабе в интервале $\approx 02:48$ UT - $03:15$ UT, представлены вариации концентрации протонов и концентрации альфа частиц. Из них следует, что выделенный участок является последовательностью микро ДС меньших масштабов. Кроме того, видно что, не смотря на высокий уровень шумовых колебаний на профилях $N_\alpha(t)$, существует высокий уровень корреляции между N_p и N_α в микро ДС вплоть до самых малых периодов (т.е. пространственных масштабов). Соответствия показаны на Рис. 3 (n.4, 5) вертикальными пунктирными прямыми.

На основе приведённых данных можно заключить что на границах ДС в ударно нагретой плазме или Sheath, также как и в ДС квазистационарного медленного СВ, связанного с поясом или цепочками стримеров, в рамках рассмотренной в статье статистики, имеет место линейная зависимость $(N_2/N_1)_\alpha$ от $(N_2/N_1)_p$.

4. Магнитосферный отклик на воздействие ДС 28.06.1999

В наблюдениях вариаций геомагнитного поля и потоков частиц прибором CAMMICE (The Charge and Mass Magnetospheric Ion Composition Experiment) числа счёта протонов отметим главную особенность – противофазные вариации модуля геомагнитного поля (Рис. 4 n.3) и потока (концентрации) протонов на орбите спутника (Рис. 4 n.2). На Рис. 4 n.2, 3 видно одновременное резкое возрастание числа счёта протонов, и резкое

падение модуля магнитного поля с задержкой ≈ 2.5 минуты по времени относительно начала контакта с магнитосферой ДС, представленной на Рис. 3 п.1-3.

Факт прохождения альфа-частиц внутрь магнитосферы подтверждается измерениями потоков протонов H^+ и альфа-частиц He^{++} приборами CAM и TIM (Toroidal Imaging Mass-Angle Spectrograph) [Chen et al., 1998]. Видно (Рис. 4 п.4, 5), что происходит импульсное возрастание потоков протонов более, чем в ~ 40 раз и альфа-частиц в ~ 30 раз в течение двух минут. Вариации потока протонов имеют импульсное возрастание. Импульсный всплеск протонов с $E = 40 \div 100$ кэВ наблюдается так же на синхронной орбите спутником LANL-1 (Рис. 4 п.6).

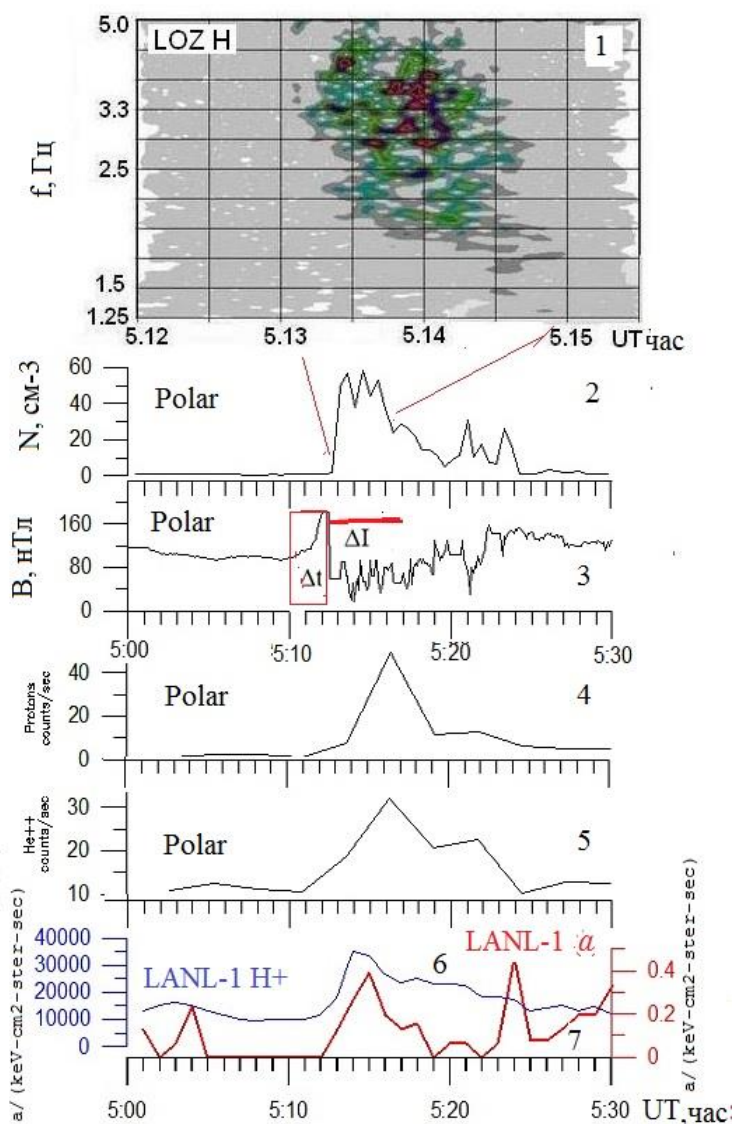


Рисунок 4. Магнитосферный отклик на контакт с ДС, источником которой является эруптивное волокно спорадического солнечного ветра. 1) спектрограмма всплеска УНЧ излучений на обс. Ловозеро; 2) вариация потока протонов на спутнике Polar; 3) вариация модуля геомагнитного поля на спутнике Polar; 4, 5) вариация потока протонов и потока альфа-частиц, зарегистрированная на спутнике Polar прибором CAM; 6) вариация потока протонов $E_p = 50 - 400$ кэВ на спутнике LANL-1; 7) вариация потока альфа-частиц на спутнике LANL-1. Вертикальной красной стрелкой обозначено начало контакта ДС с магнитосферой. Δt – время сжатия (распространения ДС от магнитопаузы до орбиты Polar), ΔI – время поступления свежей плазмы ДС на орбиту спутника.

Инжекция пучка может вызвать развитие ионно-циклотронной неустойчивости магнитосферной плазмы и генерации широкополосного всплеска геомагнитных пульсаций (ультранизкочастотных (УНЧ) излучений) в диапазоне частот $Pc1$ $f \sim 1.0 \div 5.0$ Гц [Kangas et al., 1998]. Глобальный цуг пульсаций $P1$ 2-3 (Psc) в диапазоне частот $f \sim 0.1 \div 0.003$ Гц, генерируемый за счёт сильного сжатия, предвещает импульсный высокочастотный

всплеск (не показано). Это наблюдение, подобно случаям повышенного содержания альфа-частиц в квазистационарных потоках, показанных в разделе 3, можно интерпретировать и как прохождение альфа-частиц внутрь магнитосферы и как прохождение ДС как целого (плазмоида). Дополнительным аргументом прохождения ДС, как и в случаях, рассмотренных выше, может служить сохранение её главного свойства – антикорреляции числа счёта протонов и альфа-частиц с модулем геомагнитного поля.

Часть частиц попадает в конус потерь и высыпается в атмосферу, вызывая дневные полярные сияния типа shock aurora [Zhou and Tsurutani, 1999] в UVI диапазоне в дневном каспе (Рис. 5) [Dmitriev and Suvorova, 2023]. Сияния начинаются вблизи полуденного меридиана в диапазоне широт $72^\circ - 75^\circ$, а затем свечения распространяется к востоку на ночную сторону, достигая в 05:30:10 полуночного меридиана.

Рассмотренная последовательность явлений аналогична для магнитосферного отклика на воздействие ДС в псевдо ГПС, связанном с цепочкой стримеров, позволяет сделать заключение о том, что в результате контакта с магнитосферой ДС, находящихся в отдельных частях потоков СВ различного вида (квазистационарный медленный СВ в области ГПС, ударно нагретая плазма (sheath) в спорадическом СВ, область эруптивного протуберанца в ICME), часть вещества ДС (плазмойд), включая альфа-частицы, поступает в магнитосферу.

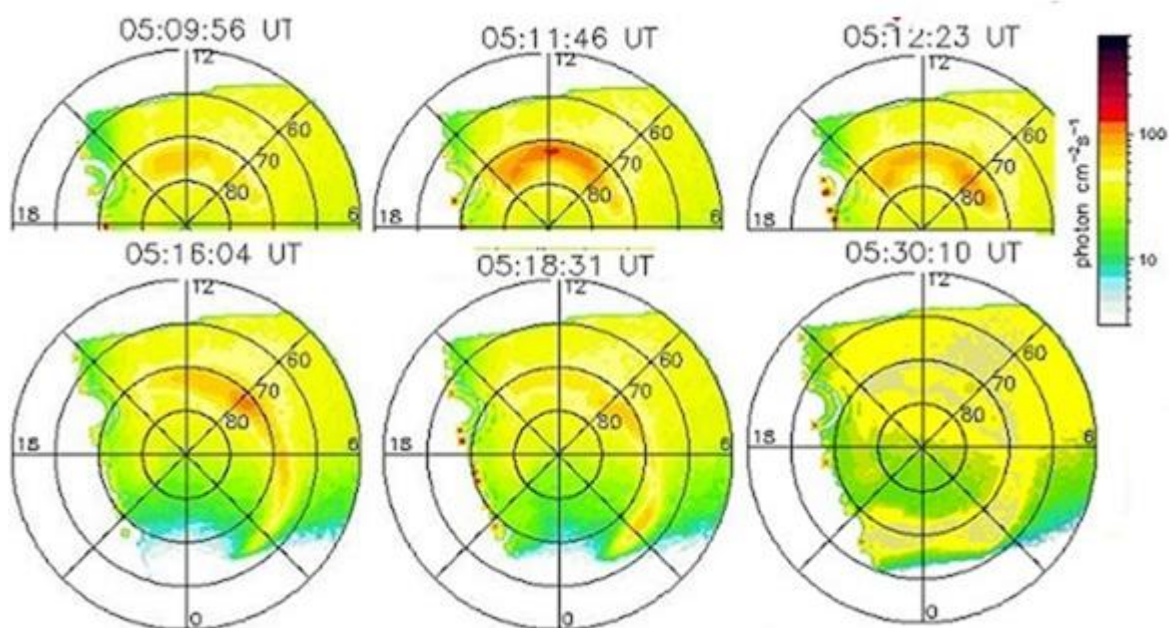


Рисунок 5. Магнитосферный отклик в полярных сияниях на контакт с ДС, источником которой является эруптивное волокно спорадического солнечного ветра. Полярные сияния, регистрируемые спутником Polar с фильтром LBHL в дневном полярном каспе.

5. Выводы

Представленные результаты показывают, что диамагнитные структуры (ДС) различного масштаба как в квазистационарном медленном СВ, так и в спорадических потоках СВ на своих границах имеют скачки концентрации плазмы $(N_2/N_1)_p$ и, одновременно, скачки концентрации альфа-частиц $(N_2/N_1)_\alpha$. Для ДС квазистационарного медленного СВ, связанной с поясом или цепочками стримеров, в рамках рассмотренной в статье статистики, имеет место единая линейная зависимость $(N_2/N_1)_\alpha$ от $(N_2/N_1)_p$. Это означает, что физическая природа возникновения этих скачков единая и она связана с эффектом диамагнетизма на границах ДС квазистационарных потоков СВ различных типов.

Магнитосферный отклик в рассмотренной номенклатуре явлений: полярных сияниях, потоках протонов и альфа-частиц, геомагнитном поле в магнитосфере и на Земле, геомагнитных пульсациях (УНЧ излучениях) подобен при воздействии ДС различной природы и их можно интерпретировать как импульсное прохождение вещества ДС (плазмоида) в магнитосферу.

Результаты исследований скачков $(N_2/N_1)_\alpha$ могут быть использованы как дополнительный важный аргумент при идентификации случаев импульсного проникновения ДС внутрь магнитосферы и при исследовании физической природы этих проникновений.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность NASA CDAWEB за предоставление данных спутников Wind, Geotail, Polar, GOES-8, GOES-10, Интербол. Авторы благодарят руководителей, разработчиков приборов и

руководителей экспериментов, проводимых на этих спутниках, за возможность использования данных. Благодарим также Г.В. Руденко за данные его расчетов и зав. сектором оптических методов ПГИ Федоренко Ю.В. за возможность использования данных индукционного магнитометра обсерватории Ловозеро. Работа В.Г. Еселевича выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Работа В.А. Пархомова выполнена в рамках госбюджетной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2021–2022 гг. «Системный анализ и методы обработки информации».

Литература

- Бородкова Н.Л. Воздействие больших и резких изменений динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли. Анализ нескольких событий. Космические исследования. 2010, Т. 48, № 1, С. 1–15.
- Веселовский И.С., Ермолаев Ю.И. Ионные составляющие солнечного ветра. Плазменная гелиофизика. Т.1. М.: Физматлит, 2008, С. 313–325.
- Еселевич В.Г. Диамагнитные структуры — основа квазистационарного медленного солнечного ветра. Солнечно-земная физика. 2019, Т. 5, № 3, С. 36–49. DOI: 10.12737/szf-53201904
- Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Проявление лучевой структуры пояса корональных стримеров в виде резких пиков концентрации плазмы солнечного ветра на орбите Земли. Геомагнетизм и аэрномия. 2006а, Т. 46, № 6, С. 811–824.
- Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Некоторые особенности пояса корональных стримеров в солнечной короне и на орбите Земли. Астрономический журнал. 2006б, Т. 83, № 9, С. 837–852.
- Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М. Наука, 1985.
- Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Чиликин В.Э. Особенности воздействия диамагнитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли. Солнечно-земная физика. 2017, Т. 3, № 4, С. 47–62. DOI 10.12737/szf-3420170544
- Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Хомутов С.Ю., Цэгмэд. Б., Райта Т. Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой спорадического солнечного ветра. Солнечно-земная физика. 2021, Т. 7, № 3, DOI: 10.12737/szf-73202102
- Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И. Поведение ионов He⁺⁺ на фронте межпланетной ударной волны. Геомагнетизм и аэрномия. 2020, Т. 60, № 6, С. 720–726.
- Belian R.D., Gisler G.R., Cayton T.E., Christensen R.A. High-Z energetic particles at geosynchronous orbit during the Great Solar Proton Event Series of October 1989. J. Geophys. Res. 1992, V. 97, P. 16897–16906.
- Borini G., Wilcox J.M., Gosling J.T., et al. Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet: A signal of coronal streamer at 1 AU. J. Geophys. Res. 1981, V. 86, P. 4565–4573.
- Chen J., Fritz T.A., Sheldon R.B., Spence H.E., Spjeldvik W.N., Fennell J.F., Livi S., Russell C.T., Pickett J.S., and Gurnett D.A. Cusp energetic particle events: Implications for a major acceleration region of the magnetosphere. J. Geophys. Res. 1998, V. 103(A1), P. 69–78, DOI: 10.1029/97JA02246
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Atmospheric Effects of Magnetosheath Jets. Atmosphere. 2023, V. 14, No. 45, P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/atmos14010045>
- Echim M.M., Lemaire J.F. Laboratory and numerical simulations of the impulsive penetration mechanism. Space Sci. Rev. 2000, V. 92, P. 56–601.
- Eselevich M.V., Eselevich V.G. The double structure of the coronal streamer belt. Solar Phys. 2006, V. 235, Iss. 1-2, P. 331–344.
- Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Paschmann G., Sckopke N. Observation of two distinct population of bow shock ions in the upstream solar wind. Geophys. Res. Lett. 1978, V. 5, P. 957–960.
- Kangas J., Guglielmi A. and Pokhotelov O. Morphology and Physics of Short-Period Magnetic Pulsations. (Review). Space Science Reviews. 1998, V. 83, P. 435–512. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005063911643>
- Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., et al. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm-like disturbances. J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2018, V. 181, P. 55–67. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.010
- Sapunova O.V., Borodkova N.L., Zastenker G.N., Yermolaev Y.I. Dynamics of He⁺⁺ Ions at Interplanetary and Earth's Bow Shocks. Universe. 2022, V. 8, No. 10, 516. <https://doi.org/10.3390/universe8100516>
- Scholer M., Terasawa T. Ion reflection and dissipation at quasiparallel collisionless shocks. Geophys. Res. Lett. 1990, V. 17, P. 119–122.
- Scholer M. Diffusions at quasi-parallel collisionless shocks: simulations. Geophys. Res. Lett. 1990, V. 17, P. 1821–1824.
- Trattner K.J., Scholer M. Diffuse alpha particles upstream of simulated quasi-parallel supercritical collisionless shocks. Geophys. Res. Lett. 1991, V. 18, No. 10, P. 1817–1820.
- Tsegmed B., Potapov A., Baatar N. Daytime geomagnetic pulsations accompanying sudden impulse of solar wind. Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. 2022, V. 62, No. 02 (242). <https://doi.org/10.5564/pmas.v62i02.2380>
- Zhou X.-Y., Tsurutani B.T. Rapid intensification and propagation of the dayside aurora: Large-scale interplanetary pressure pulses (fast shocks). Geophys. Res. Lett. 1999, V. 26, No. 8, P. 1097–1100.
- URL: [<http://wso.stanford.edu/>]
- URL: [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]
- URL: [<http://wso.stanford.edu/>]
- URL: [https://www.obsebre.es/php/geomagnetisme/vrapides/ssc_2002_d.txt]