

## РОЛЬ АЛЬФА-ЧАСТИЦ В ПРОНИКНОВЕНИИ ДИАМАГНИТНЫХ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВНУТРЬ МАГНИТОСФЕРЫ

### ROLE OF ALPHA PARTICLES IN PENETRATION OF SOLAR WIND DIAMAGNETIC STRUCTURES INTO THE MAGNETOSPHERE

**В.Г. Еселевич**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, esel@iszf.irk.ru*

**В.А. Пархомов**

*Байкальский государственный университет,  
Иркутск, Россия, pekines\_41@mail.ru*

**V.G. Eselevich**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, esel@iszf.irk.ru*

**V.A. Parkhomov**

*Baikal State University,  
Irkutsk, Russia, 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). Для ДС квазистационарного медленного СВ, связанного 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 скачки концентрации протонов и альфа-частиц имеют единую физическую природу и обуславливаются диамагнетизмом на границах ДС квазистационарных потоков СВ различных типов.

На фронте межпланетных ударных волн (МУВ) скачок  $(N_2/N_1)_\alpha$  примерно в два раза превышает скачок  $(N_2/N_1)_p$ , что отражает особенности коллективного бесстолкновительного нагрева плазмы во фронтах МУВ и требует дальнейших дополнительных исследований. Максимальное превышение (почти в три раза) относительным возрастанием концентрации альфа-частиц  $(N_2/N_1)_\alpha$  относительного возрастания концентрации протонов  $(N_2/N_1)_p$  наблюдается в эруптивных протуберанцах.

Отклик в таких явлениях, как полярные сияния, потоки протонов и альфа-частиц, геомагнитное поле, геомагнитные пульсации, подобен при воздействии на магнитосферу ДС различной природы и МУВ, например зарегистрированной 23.04.2002 на расстоянии 1 а. е. от центра Солнца. Обнаруженные особенности магнитосферного отклика на контакт с ДС различной природы и МУВ можно интерпретировать как импульсное прохождение вещества ДС (плазмоида) в магнитосферу. Результаты исследований скачков  $(N_2/N_1)_\alpha$  могут быть использованы как дополнительный аргумент при идентификации случаев импульсного проникновения ДС внутрь магнитосферы и при исследовании физической природы этих проникновений.

**Ключевые слова:** медленный солнечный ветер, спорадический солнечный ветер, отношение концентрации альфа-частиц к концентрации протонов, магнитосферный отклик на воздействие ДС и МУВ.

**Abstract.** We present the results of studies showing the presence of simultaneous jumps in the density of protons  $(N_2/N_1)_p$  and alpha particles  $(N_2/N_1)_\alpha$  at the boundaries of diamagnetic structures (DS) of various types both in the quasi-stationary slow solar wind (SW) and in sporadic SW. For DS of quasi-stationary slow SW, associated with streamer belt or chains, in the statistics considered in the paper there is a single linear dependence of  $(N_2/N_1)_\alpha$  on  $(N_2/N_1)_p$ . This means that these jumps have the same physical nature and are related to diamagnetism at the boundaries of DS of quasi-stationary SW streams of various types.

At the front of interplanetary shock waves (ISW), the  $(N_2/N_1)_\alpha$  jump is approximately twice as large as the  $(N_2/N_1)_p$  jump. This reflects the features of the collective collisionless plasma heating at ISW fronts and requires further studies. A maximum excess (almost 3 times) of the increase in the alpha-particle density  $(N_2/N_1)_\alpha$  over the increase in the proton density  $(N_2/N_1)_p$  is observed in eruptive prominences.

The magnetospheric response in such phenomena as auroras, proton and alpha particle fluxes, geomagnetic field, and geomagnetic pulsations is similar under the influence of DS of various types and ISW. The detected features of the magnetospheric response to the contact with DS of different types and ISW can be interpreted as impulsive passage of the DS matter (plasmoid) into the magnetosphere.

The results of studies of the  $(N_2/N_1)_\alpha$  jumps can be used as an additional important argument in identifying cases of impulsive penetration of DS into the magnetosphere and in examining the physical nature of these penetrations.

**Keywords:** slow solar wind, sporadic solar wind, ratio of alpha particles to protons, magnetospheric response to DS and ISW.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что диамагнитные структуры (ДС) потоков солнечного ветра (СВ) определяются по антикорреляции скачкообразного возрастания концентрации протонов ( $N_2/N_1$ )<sub>p</sub> и скачкообразного падения модуля магнитного поля  $|B_2|/|B_1|$  на границах этих ДС [Еселевич, 2019]. Этим ДС отличаются от возмущений типа магнитной дыры (magnetic hole): внутри магнитной дыры концентрация протонов постоянна (см. например, [Turner et al., 1977]).

При этом существуют ДС, связанные как с квазистационарным медленным СВ (максимальная скорость которого на расстоянии 1 а. е. от центра Солнца  $V_{\max} < 450$  км/с), так и со спорадическим СВ, вызванным корональными выбросами массы (КВМ) [Parkhomov et al., 2018]. Кроме протонов  $H^+$  второй основной компонентой ионного состава СВ являются дважды ионизированные ионы гелия  $He^{++}$ , или альфа-частицы [Веселовский, Ермолаев, 2008].

Первые исследования поведения ионов  $He^{++}$  на фронте ударной волны были выполнены в работе [Gosling et al., 1978]. В дальнейшем этот вопрос исследовался как по экспериментальным данным, так и методом моделирования [Scholer, Terasawa, 1990; Scholer, 1990; Trattner, Scholer, 1991].

Согласно [Yermolaev et al., 2021], соотношение концентраций альфа-частиц  $N_\alpha$  и протонов  $N_p$  в невозмущенном солнечном ветре различных типов на орбите Земли в среднем составляет от 1.5 до 7 %, причем за фронтом межпланетной ударной волны (МУВ)  $N_\alpha/N_p$  также близко к этим значениям. В статье [Saripova et al., 2022] детально исследована зависимость  $N_\alpha/N_p$  от скачка различных параметров на фронте МУВ и головной околоземной ударной волны.

До сих пор вопрос о наличии и роли альфа-частиц в 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, Lemaire, 2000].

В связи с этим рассмотрим вариации концентрации альфа-частиц на границе ДС потоков СВ различных типов в сравнении с вариациями концентрации протонов.

Анализ соотношения возрастных концентраций альфа-частиц с возрастанием концентрации протонов в ДС проведем для двух потоков СВ:

1) типичного медленного СВ, а точнее CIR (Corotating Interaction Region), или области взаимодействия медленного и быстрого СВ 24.04.2013 (00:14 UT);

2) типичного спорадического потока СВ, связанного с межпланетным КВМ относительно малых размеров 28.06.1999 (02:07 UT).

Затем для сравнения рассмотрим соотношение скачков концентраций протонов и альфа-частиц на фронте межпланетной ударной волны и особенности магнитосферного отклика для МУВ 23.04.2002.

## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для решения поставленной задачи использовались:

а) синоптические карты кэррингтоновских обо-

ротов для магнитного поля Солнца, рассчитанного в потенциальном приближении [<http://wso.stanford.edu>].

б) временные зависимости параметров СВ и межпланетного магнитного поля (ММП), полученные по данным OMNI [[https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/)].

в) модуль  $|B|$  ММП, концентрации протонов и альфа-частиц в зависимости от времени по данным космического аппарата (КА) Wind с разрешением 3 с, а также по данным OMNI с разрешением 1 мин. Для отождествления структур на Солнце и особенностей СВ на орбите Земли использовались методы нахождения их соответствия, изложенные в статьях [Eselevich, Eselevich, 2006; Еселевич, Еселевич, 2006a].

## 2. ДС МЕДЛЕННОГО СВ 24.04.2013

Начнем анализ с ДС медленного СВ 24.04.2013 (рис. 1). На расстоянии 1 а. е. от центра Солнца проявление ДС в медленном СВ и ММП (выделено красным прямоугольником) определяется следующими особенностями СВ [Еселевич, Еселевич, 20066; Borgini et al., 1981]:

а) повышенной концентрацией плазмы:  $N > 10 \pm 2$  см<sup>-3</sup> (панель 4);

б) невысокой скоростью:  $V \approx 290-350$  км/с (панель 5);

в) наличием в его пределах секторной границы ММП, на которой происходит изменение азимутального угла  $\Phi$  на  $\sim 180^\circ$  (от  $\sim 140^\circ$  до  $\sim 320^\circ$ ), т. е. знак ММП меняется от «+» (направление от Солнца) к «-» (к Солнцу) (панель 2).

На рис. 1 этот участок соответствует гелиосферному плазменному слою (ГПС), а его часть с максимальной концентрацией соотносится с областью взаимодействия медленного и быстрого СВ (CIR, выделена синим прямоугольником). Источником на Солнце этого участка ГПС должен быть участок пересечения пояса стримеров с эклиптической (на панели 6 показан кружком) в ближайший момент времени  $t_0 \approx 00:04$  UT 18.04.2013, когда он вследствие вращения Солнца пересекает центральный меридиан. Положение пояса стримеров на синоптической карте (панель 6) показано утолщенными кривыми, соответствующими положению нейтральной линии глобального магнитного поля, разделяющей положительную (сплошные кривые) и отрицательную (пунктир) полярности. Нейтральная линия проходит вдоль вершин арок магнитного поля, являющихся основанием пояса стримеров вблизи поверхности Солнца. Справа на панели 6 отмечен угол  $\lambda$  наклона пояса стримеров (а значит, и ГПС) к плоскости эклиптики, который больше  $10^\circ$ . Согласно [Еселевич, Еселевич, 2006a], в данном случае имеет место наклонный пояс стримеров. Оценим время  $t_E$  [ч] прихода на орбиту Земли участка пояса стримеров, выделенного на панели 6 кружком, исходя из того, что  $t_0 \approx 00:04$  UT 18.04.2013, по формуле [Еселевич, Еселевич, 20066]:

$$t_E \approx t_0 + 4.6 \cdot 10^4 / V,$$

где  $V$  — скорость [км/с] медленного СВ на расстоянии 1 а. е. от центра Солнца.

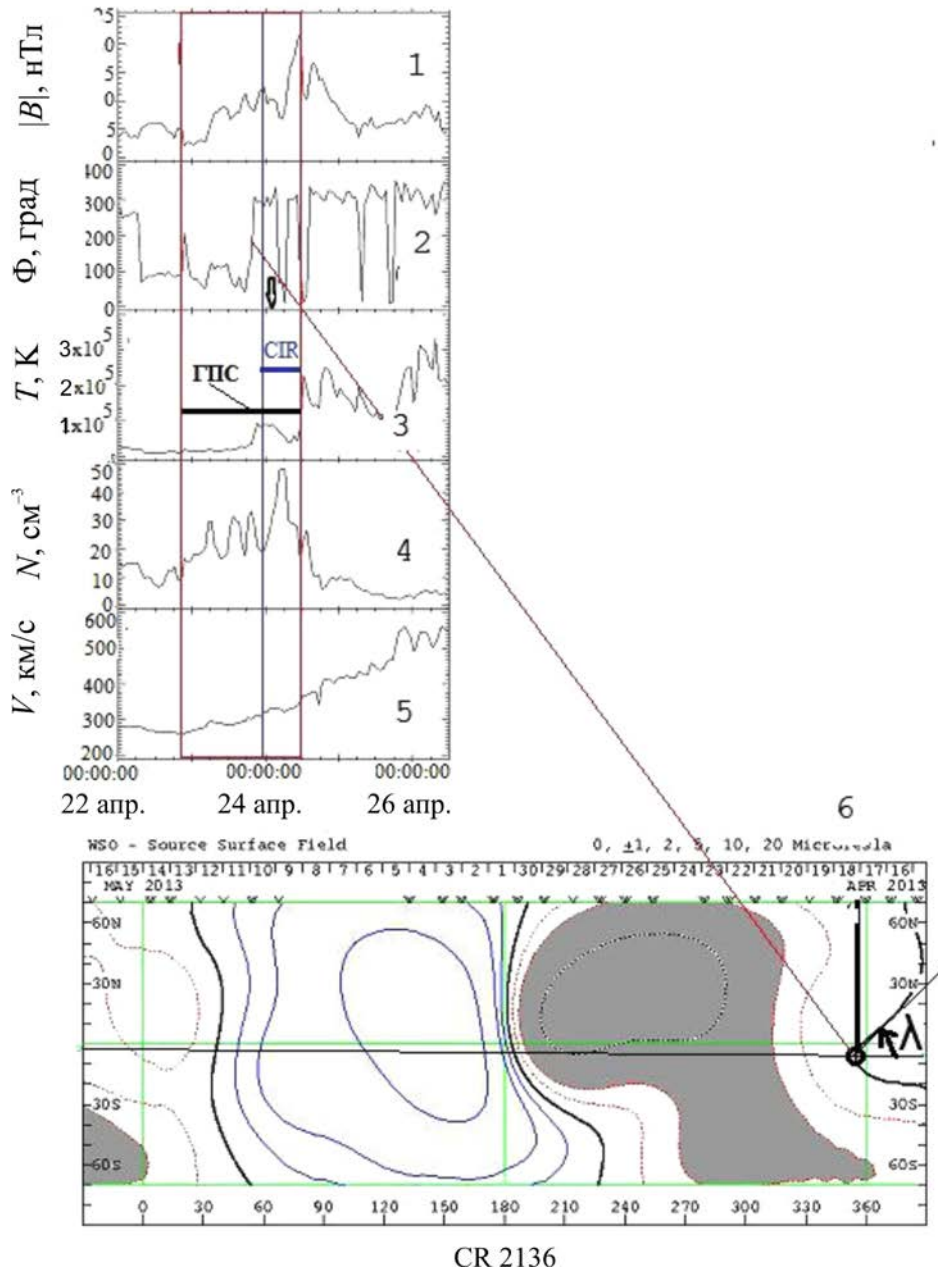


Рис. 1. Параметры ММП и плазмы СВ в зависимости от времени: панели 1, 2 — модуль  $|B|$  и азимутальный угол  $\Phi$  ММП; 3, 4 — температура и концентрация плазмы СВ; 5 — скорость СВ. Участок пояса стримеров на орбите Земли, или ГПС, выделен красным прямоугольником; участок CIR — синим прямоугольником (получено по данным OMNI [[https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/)]). Панель 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, утолщенные кривые — нейтральная линия глобального магнитного поля Солнца

Полагая согласно панели 5  $V \approx 310$  км/с, получаем  $t_E \approx 04:00$  UT 18.04.2013 + 6 сут 4 ч  $\approx 08:00$  UT 24.04.2013. На панели 2 расчетный момент показан стрелкой. Видно, что с точностью 15–20 мин расчетное время согласуется с наблюдаемым временем  $\sim 00:45$  UT 23.04.2013 прихода участка пояса стримеров на расстояние 1 а. е. в виде секторной границы ММП: знак ММП изменяется от «+» к «-». Соответствие участка нейтральной линии на Солнце, выделенного кружком на панели 6, и секторной границы ММП на расстоянии 1 а. е. на панели 2 показано красной прямой.

На панелях 1, 2 рис. 2 по антикорреляции ( $r_{N_p, B} \sim -0.9$ ) временных профилей модуля ММП и концентрации протонов  $N_p$  плазмы СВ по данным КА Wind видно, что CIR представляет собой последовательность ДС (выделены вертикальными штриховыми линиями), внутри каждой из которых наблюдаются микроДС. Эти ДС характеризуются не только скачкообразным ростом  $N_p$ , но и скачками  $N_\alpha$  (панель 3). На панелях 4, 5 для выделенной микроДС более детально представлены вариации концентраций протонов и альфа-частиц соответственно в интервале  $\sim 07:19-07:27$  UT. Из них следует, что,

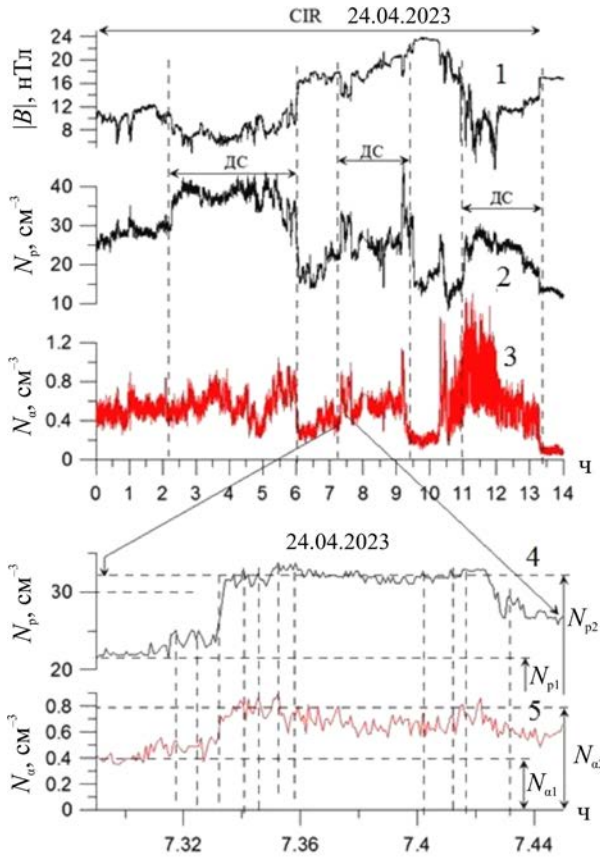


Рис. 2. Параметры ММП и плазмы СВ 24.04.2013 в зависимости от времени в CIR по данным КА Wind [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\_public/]: 1 — модуль ММП  $|B|$ ; 2 — концентрация протонов  $N_p$ ; 3 — концентрация альфа-частиц  $N_\alpha$ ; 4, 5 — профили концентраций протонов и альфа-частиц в интервале  $\sim 07:19-07:27$  UT

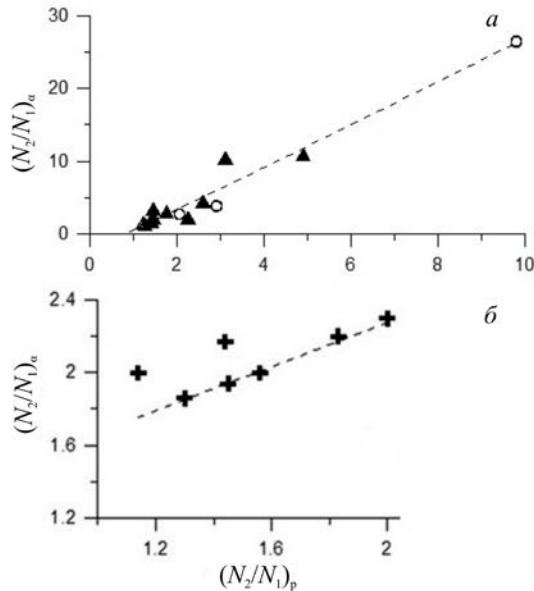


Рис. 3. Зависимость относительного скачка концентрации альфа-частиц  $(N_2/N_1)_\alpha$  от величины относительного скачка концентрации протонов  $(N_2/N_1)_p$  на границе ДС: *a* — в ГПС ( $\circ$ ), связанном с горизонтальным поясом стримеров с малым углом наклона  $\lambda \approx 10^\circ$  к плоскости эклиптики, и псевдоГПС ( $\blacktriangle$ ), связанном с цепочками стримеров; *b* — в ГПС ( $+$ ), соответствующем наклонному поясу стримеров с большим углом наклона  $\lambda > 10^\circ$  к плоскости эклиптики

несмотря 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  $N_\alpha$ , коэффициент корреляции между которыми равен  $r_{N_p,N_\alpha} = 0.54$ . Участки с наиболее высокой корреляцией показаны на панелях 4, 5 вертикальными штриховыми прямыми.

Для дальнейшего исследования динамики вариаций  $N_p$  и  $N_\alpha$  на границах микроДС различных масштабов введем понятие относительных скачков концентрации протонов  $N_{p2}/N_{p1} = (N_2/N_1)_p$  и альфа-частиц  $(N_{\alpha2}/N_{\alpha1}) = (N_2/N_1)_\alpha$ , где  $N_{p1}$  и  $N_{\alpha1}$  — концентрации частиц перед границей микроДС, а  $N_{p2}$  и  $N_{\alpha2}$  — непосредственно за ней (показаны стрелками на панелях 4, 5 справа). Значения  $N_{p1}$ ,  $N_{\alpha1}$  и  $N_{p2}$ ,  $N_{\alpha2}$  и  $(N_2/N_1)_\alpha$ ,  $(N_2/N_1)_p$  для наклонного ГПС, горизонтального ГПС и псевдоГПС, связанных с поясом и цепочками стримеров, приведены в табл. 1. Зависимость  $(N_2/N_1)_\alpha$  от  $(N_2/N_1)_p$  на границе ДС в ГПС различных типов представлена на рис. 3.

Как показывает анализ приведенных данных, для ДС квазистационарного медленного СВ, связанного с поясом или цепочками стримеров, в рамках применяемой методики имеет место линейная зависимость  $(N_2/N_1)_\alpha$  от  $(N_2/N_1)_p$ .

### 3. ОСОБЕННОСТИ ДС В ПСЕВДОГПС, СВЯЗАННОМ С ЦЕПОЧКОЙ СТРИМЕРОВ

На рис. 4 по данным табл. 1 для псевдоГПС, связанного с цепочкой стримеров 15.06.2000, приведены данные регистрации (КА Geotail и Wind) параметров ММП и плазмы в СВ.

В СВ по данным всех спутников наблюдается характерная связь между модулем  $|B|$  ММП и концентрацией протонов  $N_p$  СВ (вариации параметров антикоррелированы с  $r \sim -0.7 \div -0.9$ ), что позволяет отнести эти участки солнечного ветра к ДС с примерно одинаковой длительностью  $\sim 15$  мин и одинаковыми параметрами  $|B|$  ( $\sim 10$  нТл) и  $N_p$  ( $\sim 40$  см $^{-3}$ ), мало изменяющимися при движении в СВ. В СВ концентрации протонов и альфа-частиц варьируют синхронно (см. рис. 4, панель 3) и наблюдается скачок плотности протонов в  $\approx 4.4$  раза и альфа-частиц в  $\approx 2.6$  раза.

Удачное для наших целей положение спутников (Wind:  $X_{GSE} = 188130$  км,  $Y_{GSE} = -411540$  км,  $Z_{GSE} = -42064$  км; Geotail:  $X_{GSE} = 86646$  км,  $Y_{GSE} = 167180$  км,  $Z_{GSE} = -1334.3$  км) позволяет детально исследовать реакцию магнитосферы на воздействие ДС. Явления, составляющие магнитосферный отклик, приведены на рис. 5.

Заметим, что если в СВ время прохождения и протяженность фронта (т. е. переднего края) ДС определяются механизмом распространения, то характер вариации параметров геомагнитного поля на спутнике на начальной стадии воздействия определяется перемещением магнитопаузы и головной ударной волны к Земле (она приближается на  $\sim 4R_E$ ) и усилением токов на магнитопаузе. Это время ( $\Delta t$ , показано

Таблица 1

Дата UT	$N_{p1}, \text{см}^{-3}$	$N_{p2}, \text{см}^{-3}$	$(N_2/N_1)_p$	$N_{\alpha 1}, \text{см}^{-3}$	$N_{\alpha 2}, \text{см}^{-3}$	$(N_2/N_1)_\alpha$	Тип потока СВ, в котором наблюдалась ДС
30.12.2007 09:03 UT	6.7	9.6	$\approx 1.4$	1	1.3	$\approx 1.3$	горизонтальный ГПС, связанный с поясом стримеров
11:48 UT	7.1	11.7	$\approx 1.6$	0.07	0.12	$\approx 1.7$	ДС в ГПС
13:39 UT	10	11.5	$\approx 1.2$	0.09	0.07	$\approx 1.3$	-----
23:35 UT	8.5	11.8	$\approx 1.4$	0.78	0.62	$\approx 1.3$	-----
31.12.2007 11:00 UT	7.7	15	$\approx 2$	0.11	0.05	$\approx 2.2$	-----
15:42 UT	9.2	13.6	$\approx 1.5$	0.07	0.04	$\approx 1.7$	-----
23.04.2013							наклонный ГПС, связанный с поясом стримеров
11:30	23	26.3	$\approx 1.1$	0.34	0.68	2	ДС в ГПС
17:36	21	32.7	$\approx 1.6$	0.24	0.48	2	-----
18:30	26	34	$\approx 1.3$	0.28	0.52	$\approx 1.9$	-----
24.04.2013 02:15 UT	28	37.5	$\approx 1.3$	0.5	0.7	$\approx 1.4$	-----
07:18	22	32	$\approx 1.5$	0.36	0.7	$\approx 1.9$	-----
09:09	24	44	$\approx 1.8$	0.5	1.1	$\approx 2.2$	-----
11:08	14	28	2	0.5	1.15	$\approx 2.3$	-----
26.06.1998 09:59 UT	11	28.5	$\approx 2.6$	0.4	1.75	$\approx 4.4$	псевдоГПС, связанный с цепочкой стримеров
01.08.1998 18:07:00	8	24.5	$\approx 3.1$	0.2	2.1	$\approx 10.5$	-----
18:15:22	22	32	$\approx 1.5$	1.4	3	$\approx 2.1$	-----
18:15:33	16	23	$\approx 1.44$	0.35	1.2	$\approx 3.4$	-----
15.06.2000 00:11 UT	34	7	$\approx 5$	2.2	0.2	$\approx 11$	-----
22.12.2015 09:27 UT	17.5	10	$\approx 1.75$	0.6	0.2	$\approx 3$	-----
09:45 UT	22.5	10	$\approx 2.25$	22.5	10	$\approx 2.25$	-----

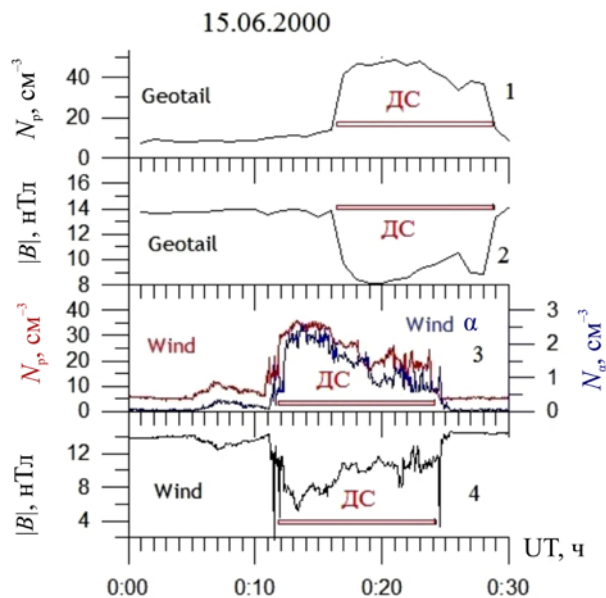


Рис. 4. Параметры ДС в солнечном ветре, источником которого является псевдоГПС, связанный с цепочкой стримеров: 1, 2 — концентрация протонов СВ и модуль ММП по данным КА Geotail; 3, 4 — концентрации протонов и альфа-частиц СВ и модуль ММП по данным КА Wind. Длина красного прямоугольника соответствует длительности ДС

красным прямоугольником на панелях 2, 3 рис. 5) может считаться первой стадией воздействия ДС на магнитосферу. Вторая стадия (обозначена красной ли-

нией с символом  $\Delta I$  на панели 3) характеризуется изменениями в противофазе модуля геомагнитного поля (ГМП) (см. рис. 5, панель 3) и концентрации протонов (рис. 5, панель 2) на орбите КА Polar. Подобная закономерность для вариаций плотности альфа-частиц в энергетическом диапазоне 1–200 кэВ и величины локального геомагнитного поля обнаружена в работе [Chen et al., 1998]. Мы предполагаем, что этот временной интервал может соответствовать импульсному поступлению вещества ДС (плазмоида) из СВ на орбиту спутника. Противофазность вариаций  $N$  и  $B$  как в СВ, так и в магнитосфере может служить универсальным тестом существования диамагнитных структур.

Плазмоид в магнитосфере, так же как и ДС в солнечном ветре, определяется по величине отрицательного коэффициента корреляции между модулем геомагнитного поля и концентрацией электронов или потоками протонов и альфа-частиц. Этот признак может служить универсальным тестом существования диамагнитных структур.

По времени запаздывания начала возрастания ГМП на КА GOES-8 по отношению к КА Polar и GOES-10, скорость движения ДС плазмоида внутри магнитосферы составляет  $\sim 280$  км/с, что близко к определенной нами скорости движения плазмоида ( $\sim 175$  км/с) внутри магнитосферы для ДС, связанной со спорадическим СВ [Пархомов и др., 2021].

Наземные высокоширотные обсерватории зарегистрировали внезапный импульс ГМП в 00:17 UT

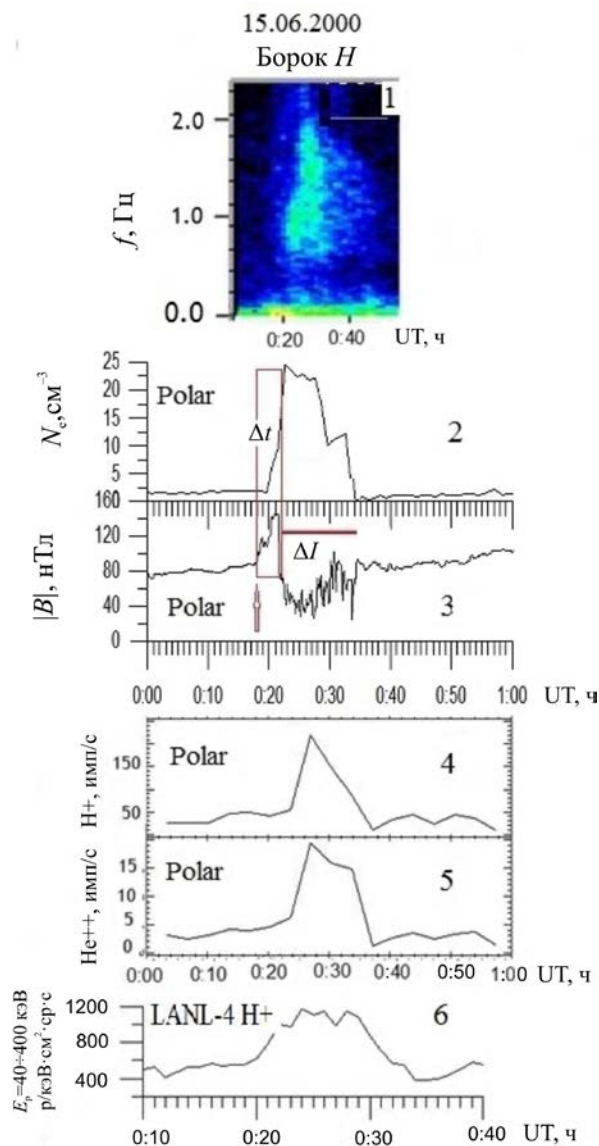


Рис. 5. Магнитосферный отклик на воздействие ДС в псевдоПГС, связанном с цепочкой стримеров: 1 — спектрограмма всплеска геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.5–2.5 Гц в обсерватории «Борок»; зарегистрированные на КА Polar; 2, 3 — вариации концентрации электронов и геомагнитного поля;  $\Delta t$  — время нарастания геомагнитного поля и концентрации электронов, вызванного сжатием магнитосферы;  $\Delta I$  — вариации геомагнитного поля и концентрации частиц, связанные с поступлением вещества ДС; 4, 5 — вариации потоков протонов и альфа-частиц (по измерениям приборов SAMMICE и TIMAS); 6 — вариации потока протонов на геостационарной орбите КА LANL-4. Красная стрелка на панели 3 отмечает момент контакта ДС с магнитопаузой

с предварительным обратным импульсом длительностью  $\sim 2$  мин и амплитудой  $\sim 20$  нТл (Thule) [https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\_V1/GINForms2], сопровождаемый всплеском геомагнитных пульсаций Pi2–3 (Psc) в частотном диапазоне  $0.1 \div 0.005$  Гц и, что особенно важно, всплеском ультранизкочастотных (УНЧ) геомагнитных пульсаций типа Pc1 (0.5–2.5 Гц) (см. рис. 5, панель 1). Однако в событиях ДС, рассмотренных в [Chen et al., 1998], УНЧ-всплески имеют больший частотный диапазон и отнесены к классу lion rare (львиный рык,  $1 \div 100$  Гц) [Tsurutani et al., 1982].

Одновременность описываемых явлений позволяет предположить (см. рис. 5, панели 2–5), что зарегистрированные КА Polar резкое возрастание концентрации электронов, протонов и альфа-частиц, источником которых может быть инжекция плазмы, и отрицательный всплеск модуля ГМП являются причиной генерации всплеска геомагнитных пульсаций. Эта инжекция приводит к неустойчивости плазмы [Guglielmi, Potarov, 2021; Молчанов, 1985] на орбите Polar и генерации всплеска Pc1 с нестационарным спектром (см. рис. 5, панель 1), начало которого запаздывает относительно начала внезапного импульса и цуга Psc (Pi2–3), генерируемого волной сжатия в результате контакта переднего края ДС с магнитопаузой. Скорость распространения волны сжатия  $\sim 1000$  км/с, поэтому сигнал о приходе плазмоида, движущегося со скоростью  $\sim 300$  км/с, запаздывает относительно сигнала о начале контакта. Сошлемся на результаты работы [Tsegmed et al., 2022], где обнаружена задержка 30 с между моментом контакта МУВ с магнитосферой и началом генерации геомагнитных пульсаций.

Ультрафиолетовый фотометр UVI на КА Polar регистрирует полярные сияния (рис. 6) в околополюденном секторе полярной шапки (дневном каспе). Здесь представлены последовательные снимки сияний с фильтром LBHL как отклик на контакт с ДС. Снимки полярных сияний заимствованы из [Бородкова, 2010].

Высыпания частиц в ионосферу и начало сияний ближе по времени к началу контакта, началу генерации Psc и началу сжатия (что наблюдается и в других событиях shock aurora), чем к началу развития неустойчивости за счет разницы скоростей движения волны сжатия  $S_i$  и плазмоида внутри магнитосферы.

Таким образом, для ДС квазистационарного медленного СВ, связанных с поясом или цепочками стримеров, имеет место не только линейная зависимость  $(N_2/N_1)_\alpha$  от  $(N_2/N_1)_p$ , но и прохождение части вещества ДС (плазмоида) — протонов и альфа-частиц — внутрь магнитосферы до орбит КА Polar, GOES и Geotail. Часть частиц попадает в конус потерь и выпадает в атмосферу, вызывая дневные полярные сияния в UV-диапазоне (см. рис. 6).

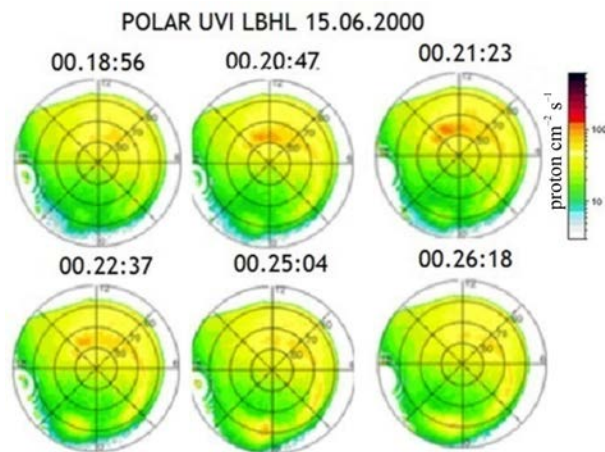


Рис. 6. Полярные сияния, регистрируемые КА Polar с фильтром LBHL в дневном полярном каспе [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\_public/]

#### 4. 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 ранее 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 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 Sheath за ударной волной и заканчивая межпланетным транзитом малых размеров, включающим в себя плотное волокно; во-вторых, с точки зрения сравнения временных профилей концентраций альфа-частиц и протонов спорадического СВ с аналогичными профилями для потоков СВ других типов.

Как показано на рис. 7 (панель 1) и было установлено ранее [Пархомов и др., 2017], этот спорадический поток СВ является последовательностью ударной волны (Shock), Sheath и межпланетного транзита малых размеров (ICME). На рис. 7 (панели 1, 2) по антикорреляции временных профилей  $|B|$  ММП и  $N_p$  в СВ видно, что рассматриваемый спорадический СВ представляет собой последовательность ДС (выделенных вертикальными штрихами), внутри каждой из которых имеют место микроДС. Наибольший скачок  $N_p$  характерен для ДС, связанной с эруптивным волокном, которое регистрируется в интервале времени ~04:42–05:12 UT. Как видно на панелях 2, 3, все скачки концентрации протонов в каждой последовательности ДС сопровождаются скачками концентрации альфа-частиц.

На панелях 4, 5 более подробно представлены вариации концентраций протонов и альфа-частиц в ~02:48–03:15 UT (этот интервал отмечен синими линиями). Видно, что выделенный участок является последовательностью микроДС. Кроме того, несмотря на высокий уровень шумовых колебаний на профилях  $N_\alpha(t)$ , существует высокий уровень корреляции между  $N_p$  и  $N_\alpha$  в микроДС вплоть до самых малых периодов, т. е. пространственных масштабов. Соответствия показаны на панелях 4, 5 вертикальными штриховыми прямыми. Концентрации протонов СВ и альфа-частиц для двух ДС в Sheath и Ejecta даны в табл. 2 и представлены в виде графика на рис. 8.

Проведенный анализ показывает, что в рамках рассмотренной в статье статистики на границах ДС в области Sheath, так же как и в ДС квазистационарного медленного СВ, связанного с поясом или цепочками стримеров, имеет место линейная зависимость  $(N_2/N_1)_\alpha$  от  $(N_2/N_1)_p$ .

#### 5. МАГНИТОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ДС 28.06.1999

В вариациях геомагнитного поля и потоков частиц (числа протонов в секунду в случае прибора

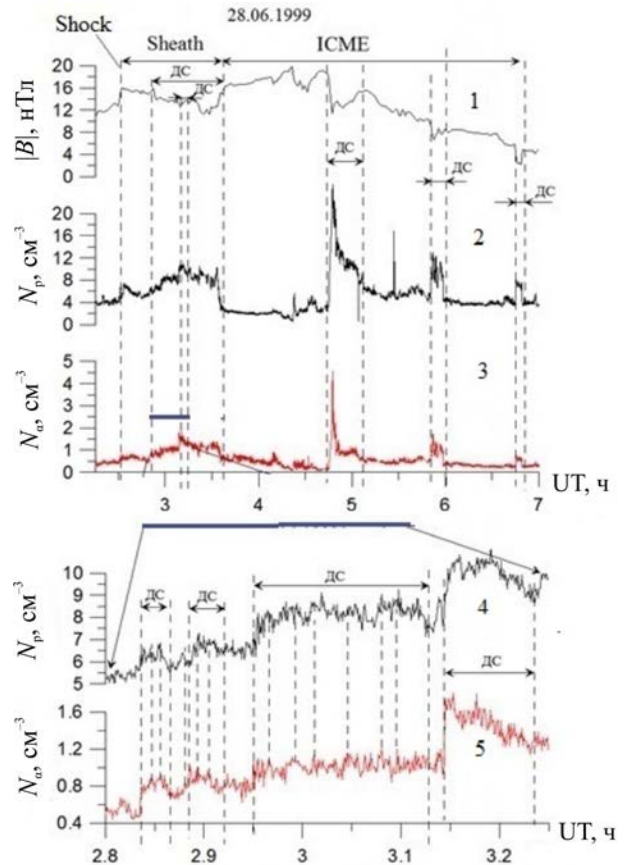


Рис. 7. Вариации параметров ММП и СВ в зависимости от времени по данным КА Wind 28.06.1999 [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\_public/]: 1 — модуля ММП; 2 — концентрации протонов; 3 — концентрации альфа-частиц; 4, 5 — концентраций протонов и альфа-частиц соответственно в интервале ~02:48–03:15 UT (показан синей утолщенной линией)

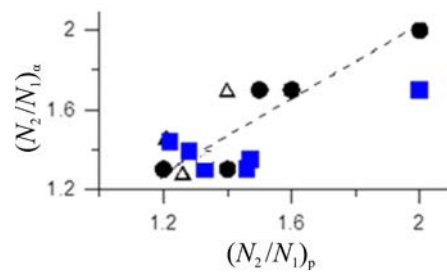


Рис. 8. Зависимость относительного скачка концентрации альфа-частиц  $(N_2/N_1)_\alpha$  от величины относительного скачка концентрации протонов  $(N_2/N_1)_p$  на границе ДС:  $\Delta$  — в ударно-нагретой плазме, или Sheath;  $\bullet$  — в области эруптивного протуберанца в ICME;  $\blacksquare$  — в ударно-нагретой плазме Sheath и Ejecta

CAMMICE (The Charge and Mass Magnetospheric Ion Composition Experiment) [Chen et al., 1998]), представленных на рис. 9, отметим главную особенность — противофазные вариации модуля геомагнитного поля и концентрации протонов на орбите КА Polar. Отчетливо видны резкие одновременные возрастание концентрации протонов (панель 2) и падение модуля магнитного поля (панель 3), запаздывающие на ~2.5 мин относительно начала контакта с магнитосферой ДС, представленной на панелях 1–3 рис. 7.

Факт прохождения альфа-частиц внутри магнитосферы подтверждается измерениями потоков протонов

Таблица 2

Дата, UT	$N_{p1}, \text{см}^{-3}$	$N_{p2}, \text{см}^{-3}$	$(N_2/N_1)_p$	$N_{a1}, \text{см}^{-3}$	$N_{a2}, \text{см}^{-3}$	$(N_2/N_1)_a$	Тип потока СВ, в котором наблюдалась ДС
28.06.1999 02:48	10.3	5.3	~1.9	1.7	0.56	~3.4	спорадический СВ
02:50	6.43	5.3	~1.2	0.8	0.6	~1.4	-----
02:58	8.2	6.5	~1.3	1.0	0.8	~1.3	-----
03:09	10.5	7.5	~1.4	1.7	1.0	~1.7	-----
04:48	25	2.55	~9.8	4.5	0.17	~26	эруптивное волокно
05:52	12.5	4.3	~2.9	1.7	0.45	~3.8	-----
06:47	10.2	2.5	~4.1	6.7	2.5	~2.7	-----
18.05.2013							спорадический СВ
01:51 UT	25	17	~1.5	0.54	0.4	~1.4	ДС в Ejecta
02:37 UT	17	15	~1.3	0.56	0.43	~1.3	-----
03:20 UT	17	9	~1.9	5.8	3.5	~1.7	-----
03:36 UT	15	10.3	~1.45	0.48	0.38~	1.3	-----
03:47 UT	16	12.5	~1.3	5	3.6	~1.4	-----
03:52 UT	16.5	13.5	~1.2	0.52	0.36	~1.4	-----

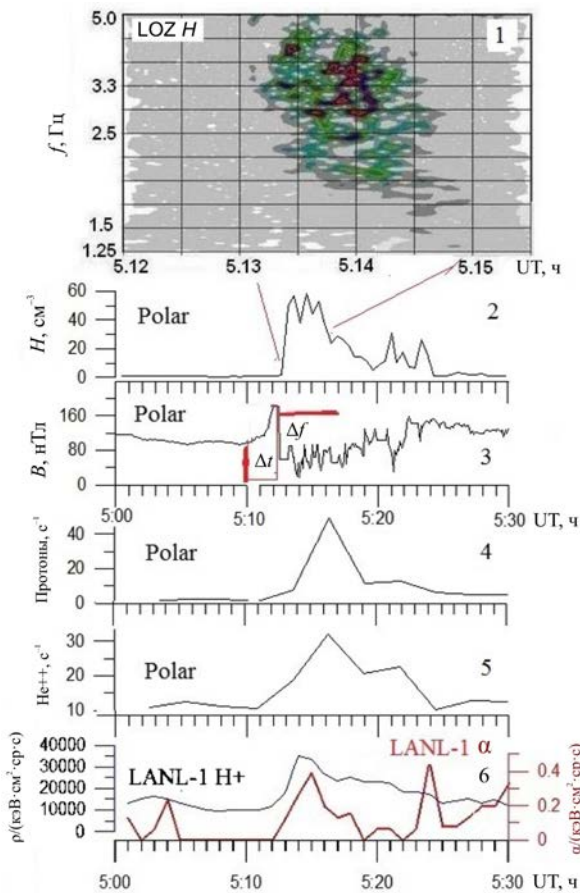


Рис. 9. Магнитосферный отклик на контакт с ДС, источником которой является эруптивное волокно спорадического СВ: 1 — спектрограмма всплеска УНЧ-излучения на ст. Ловозеро; зарегистрированные на КА Polar: 2, 3 — вариации потока протонов и модуля геомагнитного поля; 4, 5 — вариации потоков протонов и альфа-частиц; 6 — вариации потоков протонов с  $E_p=50-400$  кэВ (синий цвет) и альфа-частиц (красный цвет), зарегистрированные на КА LANL-1. Вертикальной красной стрелкой на панели 3 обозначено начало контакта ДС с магнитосферой;  $\Delta t$  — время сжатия (время распространения ДС от магнитопаузы до орбиты КА Polar);  $\Delta t$  — время поступления плазмы ДС на орбиту спутника. Красные линии на панели 2 отмечают временное совпадение генерации всплеска и поступления свежей плазмы

$H^+$  и альфа-частиц  $He^{++}$  приборами CAMMICE и TIMAS (Toroidal Imaging Mass-Angle Spectrograph). На панелях 4, 5 рис. 9 видны импульсные возрастания потоков протонов более чем в ~40 раз и альфа-частиц в ~30 раз в течение двух минут. Импульсный всплеск протонов с  $E=40-100$  кэВ наблюдается также на геосинхронной орбите КА LANL-1 (панель 6).

Инжекция пучка может вызвать развитие пучковой неустойчивости магнитосферной плазмы и генерацию широкополосного всплеска геомагнитных УНЧ-пульсаций в диапазоне частот Pc1  $f \sim 1.0-3.3$  Гц [Kangas et al., 1998]. Глобальный цуг пульсаций Pi2-3 (Psc) в диапазоне частот  $f \sim 0.1-0.003$  Гц, генерируемый за счет сильного сжатия, предваряет импульсный высокочастотный всплеск (не показано). Это наблюдение, подобно случаям повышенного содержания альфа-частиц в квазистационарных потоках СВ (см. раздел 3), можно интерпретировать и как прохождение альфа-частиц внутрь магнитосферы, и как прохождение ДС как целого в виде плазмоида. Дополнительным аргументом в пользу прохождения ДС, как и в рассмотренных выше случаях, может служить сохранение ее главного свойства — антикорреляции скорости счета 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, Tsurutani, 1999] в UV-диапазоне в дневном каспе (рис. 10) [Dmitriev, Suvorova, 2023]. Сияния начинаются вблизи полуденного меридиана в диапазоне широт  $72^\circ-75^\circ$ , а затем свечение распространяется к востоку на ночную сторону, достигая в 05:30:10 UT полуночного меридиана.

Последовательность явлений аналогична магнитосферному отклику на воздействие ДС в псевдоГПС, связанном с цепочкой стримеров (см. раздел 3).

Можно констатировать, что в результате контакта с магнитосферой диамагнитных структур, находящихся в различных потоках СВ и их областях (квазистационарный медленный СВ в области ГПС, Sheath в спорадическом СВ, область эруптивного протуберанца в ICME), часть вещества ДС (плазмоид), в том числе альфа-частицы, поступает в магнитосферу.



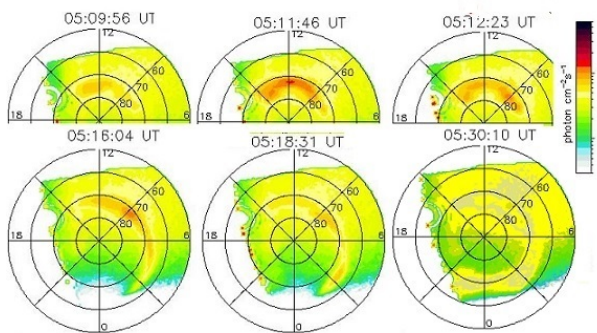


Рис. 10. Магнитосферный отклик в полярных сияниях на контакт с ДС, источником которой является эруптивное волокно спорадического солнечного ветра. Полярные сияния зарегистрированы КА Polar с фильтром LBHL в дневном полярном каспе

### 6. ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОСФЕРНЫХ ОТКЛИКОВ, СВЯЗАННЫХ СО СКАЧКАМИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОТОНОВ И АЛЬФА-ЧАСТИЦ ВО ФРОНТАХ МУВ

Для полноты картины рассмотрим особенности соотношения концентраций протонов и альфа-частиц на фронтах МУВ.

Одна из первых попыток изучения этого соотношения была сделана в статье [Сапунова и др., 2020] и продолжена в [Sapunova et al., 2022]. Мы рассмотрели соотношения  $(N_2/N_1)_\alpha$  и  $(N_2/N_1)_p$  в восьми случаях МУВ, приведенных в табл. 3.

На рис. 11 видно, что соотношения скачков концентрации протонов и альфа-частиц на фронте МУВ связаны линейной зависимостью, что подтверждает, с одной стороны, результаты цитированной работы, а с другой — показывает их подобие соотношениям этих параметров в ДС квазистационарного и спорадического СВ. Особенности соотношения скачков  $(N_2/N_1)_\alpha$  и  $(N_2/N_1)_p$  и их воздействие на магнитосферу во фронте МУВ 23.04.2002 детально рассмотрим далее.

### 7. МАГНИТОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МУВ 23.04.2002

Последовательность явлений магнитосферного отклика на контакт с МУВ 23.04.2002 (рис. 12) оказалась близкой по морфологии откликам на воздействие ДС, переносимых структурами СВ различной природы. Однако необходимо отметить, что, согласно литературным источникам, в большинстве случаев воздействия МУВ на магнитосферу наблюдается иная последовательность явлений, связанных с резким сжатием магнитосферы МУВ [Russell et al., 2000].

Контакт рассматриваемой МУВ с магнитосферой приводит на орбите КА Polar к антикоррелированному скачку концентрации ионов на  $\sim 40 \text{ см}^{-3}$  (см. рис. 12, панель 2) и модуля геомагнитного поля на  $\sim 50 \text{ нТл}$  (см. рис. 12, панель 3). Синхронно с возрастанием концентрации ионов и электронов происходит возрастание потоков протонов и альфа-частиц

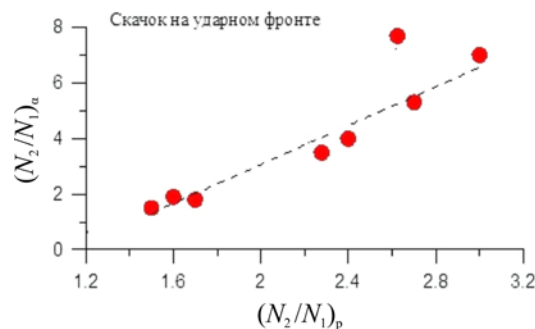


Рис. 11. Зависимость относительного скачка концентрации альфа-частиц  $(N_2/N_1)_\alpha$  от относительного скачка концентрации протонов  $(N_2/N_1)_p$  на фронте межпланетных ударных волн

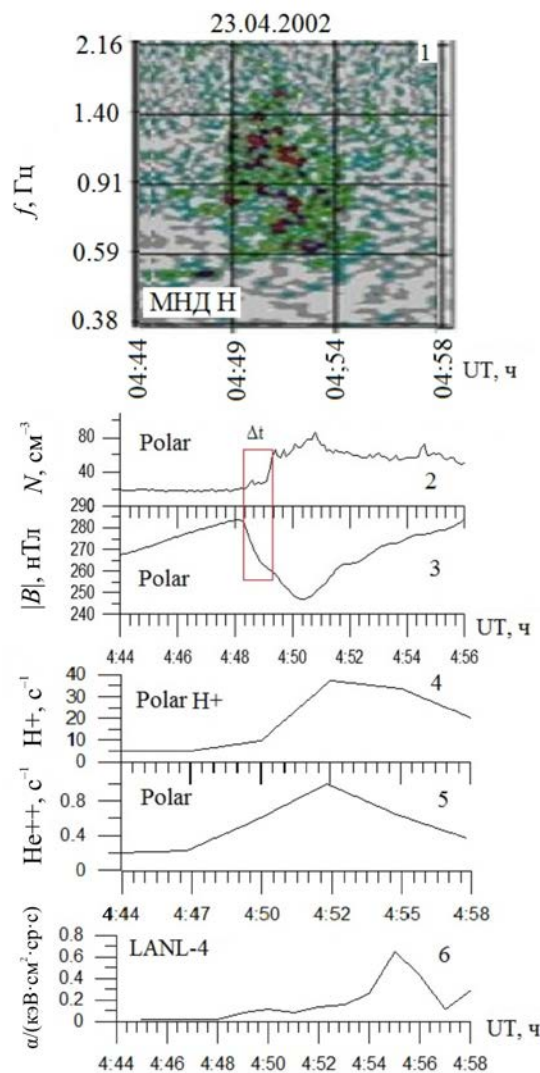


Рис. 12. Магнитосферный отклик на воздействие МУВ 23.04.2002: 1 — спектрограмма УНЧ-излучения на ст. Монды; зарегистрированные на КА Polar: 2, 3 — вариации концентрации ионов и модуля геомагнитного поля; 4, 5 — вариации потоков протонов и альфа-частиц (по измерениям приборов SAMMICE и TIMAS); 6 — поток альфа-частиц, зарегистрированный на КА LANL-4;  $\Delta t$  — разность времени между контактом МУВ с магнитопаузой и приходом плазмы на орбиту спутника

в интервале 04:44–04:56 UT (панели 4, 5). Резкий всплеск потока альфа-частиц (панель 6) в это же время зарегистрирован также на КА LANL-4 [Belian

Таблица 3

Дата, UT	$N_{p1}$ , см <sup>-3</sup>	$N_{p2}$ , см <sup>-3</sup>	$(N_2/N_1)_p$	$N_{\alpha 1}$ , см <sup>-3</sup>	$N_{\alpha 2}$ , см <sup>-3</sup>	$(N_2/N_1)_\alpha$	Фронт МУВ
18.05.2013 00:20	4.5	7.7	≈1.7	0.25	0.43	≈1.7	-----
14.12.2015 00:20	7.3	11.6	≈1.6	0.25	0.47	≈1.9	-----
17.03.2015 04:00	12	29	≈2.4	0.35	1.40	≈4	-----
22.06.2015 18:08	18	48	≈2.7	0.6	3.2	≈5.3	-----
16.07.2015 05:11	7	21	≈3	0.06	0.43	≈7	-----
24.09.1998 23:45	6	17	~2.8	0.7	5	~7.1	-----
28.06.1999 02:30	4.2	7.1	≈1.7	0.44	0.64	≈1.5	-----
23.04.2002 04.40	5	13.1	~2.6	0.25	0.87	~3.5	-----

et al., 1992], который находился на геостационарной орбите на долготе (103°), близкой к долготам геомагнитных обсерваторий Иркутск (104.3°) и Монды (100.9°).

На Земле по данным сайта «Rapid catalog SSC» [<https://www.obsebre.es/en/rapid>] в 04:47:30 зафиксировано глобальное внезапное начало (SSC) слабой магнитной бури с максимальным  $Dst = -40$  нТл 24.04.2002 в 05 UT. Внезапное возрастание геомагнитного поля (в течение трёх минут на ~55 нТл) зарегистрировано и в среднеширотной обсерватории Иркутск, находящейся вблизи местного полудня [[https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1/GINForms2](https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2)]. Внезапное начало бури сопровождается импульсным всплеском геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.002–3.3 Гц, причем в области 0.3–3.3 Гц наблюдается кратковременный всплеск УНЧ-излучения с заметным падением частоты (панель 1). Такой же всплеск УНЧ-излучения по форме, длительности и диапазону частот зарегистрирован в этот момент на КА Polar [Tsegmed et al., 2022]. Заметим, что всплеск пульсаций по форме и диапазону регистрируемых частот подобен всплеску пульсаций Pc1 при воздействии ДС стационарного и спорадического СВ, представленных в предыдущих разделах.

Отклик в полярных сияниях в UV-диапазоне на воздействие МУВ 23.04.2002, зарегистрированный КА IMAGE, оказался близким по своей морфологии откликом на воздействие ДС различной природы, зарегистрированным фотометром КА Polar.

Прежде всего, так же как и в случаях воздействия ДС, генерируется shock aurora значительной интенсивности (рис. 13). В течение 4 мин свечение охватывает весь овал сияний. Наиболее интенсивное свечение совпало по времени (04:49:30–04:51:44 UT) с максимальным падением модуля геомагнитного поля на ~50 нТл (см. рис. 12, панель 3) и скачком концентрации ионов на ~40 см<sup>-3</sup> на орбите КА Polar (см. рис. 12, панель 2).

Таким образом, анализ магнитосферного отклика на воздействие МУВ 23.04.2002 показывает его большое подобие явлениям, составляющим отклик на воздействие ДС всех типов. Это подобие позво-

ляет сформулировать гипотезу о том, что часть энергии этой МУВ проникает в магнитосферу подобно импульсному прохождению вещества ДС в виде плазмоида. Подтверждением гипотезы может быть регистрация всплесков концентрации протонов в энергетическом диапазоне  $E_p = 50-400$  кэВ (концентрация возрастает в 40 раз в течение ~1 мин). Так же резко в ~60 раз возрастает поток альфа-частиц (см. рис. 12, панель 5). В низкочастотном диапазоне регистрируется цуг затухающих длиннопериодных колебаний Pi2–3 (Psc), подобный нерегулярным колебаниям Pi2–3 при контактах с магнитосферой ДС разной природы и эруптивного протуберанца [Пархомов и др., 2022].

Примечательно, что всплеск УНЧ-излучения (см. рис. 12, панель 1) подобен всплескам геомагнитных пульсаций в том же диапазоне частот, зарегистрированным при контактах с магнитосферой ДС как стационарного (см. рис. 5, панель 1), так и спорадического (см. рис. 9, панель 1) СВ. Можно сделать вывод, что отклик на контакт с любыми ДС в магнитосферных и наземных явлениях подобен.

## ВЫВОДЫ

Представленные результаты показывают, что диамагнитные структуры различных масштабов, присутствующие как в квазистационарном медленном СВ, так и в спорадических потоках СВ, на своих границах имеют одновременные скачки концентрации протонов  $(N_2/N_1)_p$  и альфа-частиц  $(N_2/N_1)_\alpha$  (что подтверждает выводы [Веселовский, Ермолаев, 2008; Yermolaev et al., 2021]).

Для ДС квазистационарного медленного СВ, связанного со стримерами, 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 одина и обусловлена диамагнетизмом на границах ДС квазистационарных потоков СВ различных типов.

На фронте межпланетных ударных волн скачок  $(N_2/N_1)_\alpha$  примерно в два раза превышает скачок  $(N_2/N_1)_p$  (что подтверждает выводы [Sapunova et al., 2022]).

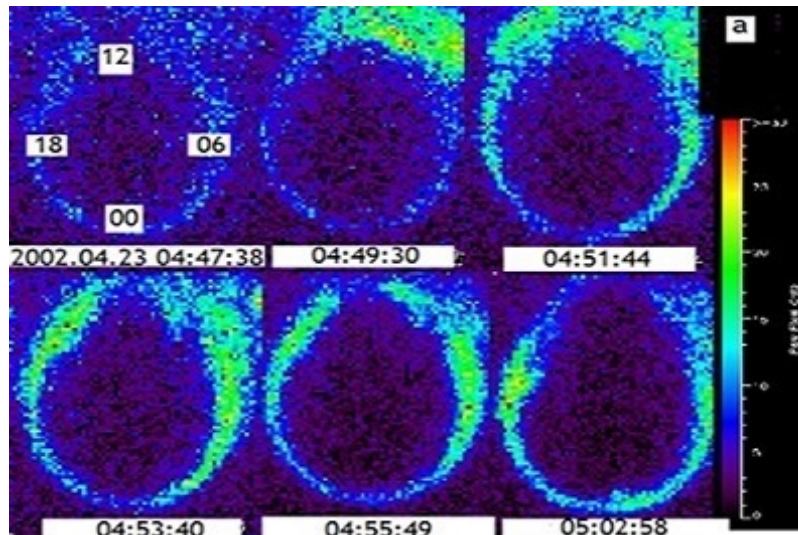


Рис. 13. Магнитосферный отклик в полярных сияниях на взаимодействие с МУВ 23.04.2002. Полярные сияния, начавшиеся на дневной стороне, зарегистрированы КА IMAGE [[https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/)]

Это отражает особенности коллективного бесстолкновительного нагрева плазмы во фронтах МУВ. Максимальное (почти в три раза) возрастание концентрации альфа-частиц  $(N_2/N_1)_\alpha$  по сравнению с возрастанием концентрации протонов  $(N_2/N_1)_p$  наблюдается в эруптивных протуберанцах.

Магнитосферный отклик в рассмотренных явлениях: полярных сияниях, потоках протонов и альфа-частиц, геомагнитном поле, геомагнитных пульсациях УНЧ-диапазона — подобен при воздействии ДС различной природы и рассмотренной МУВ. Обнаруженные особенности магнитосферного отклика на контакт с ДС различной природы и МУВ можно интерпретировать как импульсное прохождение вещества ДС (плазмоида) в магнитосферу.

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

Авторы выражают искреннюю признательность NASA CDAWEB за предоставление данных КА Wind, Geotail, Polar, GOES-8, GOES-10, IMAGE, Интербол-1. Авторы благодарят разработчиков приборов и руководителей экспериментов, проводимых на этих спутниках, за возможность использования данных. Благодарим также Г.В. Руденко за данные его расчетов и Б.В. Довбню за обработку записей геомагнитных пульсаций в обсерватории «Борок». Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>]. Мы благодарим С.В. Анисимова, директора ГО «Борок» ИФЗ РАН, за возможность использования данных индукционных магнетометров обсерватории «Борок».

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (В.Г. Еселевич — базовая программа ФНИ П.16), а также в рамках государственной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2021–2022 гг. «Системный анализ и методы обработки информации» (В.А. Пархонов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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](https://doi.org/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 аэрономия*. 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. 223 с.
- Пархонов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г. и др. Особенности воздействия диамагнитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 47–62. DOI: [10.12737/szf-3420170544](https://doi.org/10.12737/szf-3420170544).
- Пархонов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. и др. Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой спорадического солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. DOI: [10.12737/szf-73202102](https://doi.org/10.12737/szf-73202102).
- Пархонов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Геоэффективность эруптивного протуберанца. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2022. Т. 4, № 2. С. 123–151.
- Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И. Поведение ионов  $\text{He}^{++}$  на фронте межпланетной ударной волны. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020. Т. 60, № 6. С. 720–726. DOI: [10.31857/S0016794020060127](https://doi.org/10.31857/S0016794020060127).
- 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. Vol. 97. P. 16897.
- Borriani 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. Vol. 86. P. 4565.

Chen J., Fritz T.A., Sheldon R.B., et al. Cusp energetic particle events: Implications for a major acceleration region of the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, iss. A1. P. 69–78. DOI: [10.1029/97JA02246](https://doi.org/10.1029/97JA02246).

Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Atmospheric effects of magnetosheath jets. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14, no. 45. P. 1–15. DOI: [10.3390/atmos14010045](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. Vol. 92. P. 566–601.

Eselevich M.V., Eselevich V.G. The double structure of the coronal streamer belt. *Solar Phys.* 2006. Vol. 235, iss. 1–2. P. 331–344.

Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., et al. Observation of two distinct population of bow shock ions in the upstream solar wind. *Geophys. Res. Lett.* 1978. Vol. 5. P. 957–960.

Guglielmi A.V., Potapov A.S. Frequency-modulated ultra-low-frequency wave in near-Earth space. *Physics-Uspokhi*. 2021. Vol. 64, iss. 5. P. 452–467. DOI: [10.3367/UFNe.2020.06.038777](https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.06.038777).

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A review). *Space Sci. Rev.* 1998. Vol. 83. P. 435–512. DOI: [10.1023/A:1005063911643](https://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. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 181. P. 55–67. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.010).

Russell C.T., Wang Y.L., Raeder J., et al. The interplanetary shock of September 24, 1998: Arrival to Earth. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, iss. A11. P. 25143–25154. DOI: [10.1029/2000JA900070](https://doi.org/10.1029/2000JA900070).

Sapunova O.V., Borodkova N.L., Zastenker G.N., Yermolaev Y.I. Dynamics of He<sup>++</sup> ions at interplanetary and Earth's bow shocks. *Universe*. 2022. Vol. 8, iss. 10, 516. DOI: [10.3390/universe8100516](https://doi.org/10.3390/universe8100516).

Scholer M. Diffusions at quasi-parallel collisionless shocks: simulations. *Geophys. Res. Lett.* 1990. Vol. 17. P. 1821–1824.

Scholer M., Terasawa T. Ion reflection and dissipation at quasiparallel collisionless shocks. *Geophys. Res. Lett.* 1990. Vol. 17. P. 119–122.

Trattner K.J., Scholer M. Diffuse alpha particles upstream of simulated quasi-parallel supercritical collisionless shocks. *Geophys. Res. Lett.* 1991. Vol. 18, iss. 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. Vol. 62, iss. 02, 242. DOI: [10.5564/pmas.v62i02.2380](https://doi.org/10.5564/pmas.v62i02.2380).

Tsurutani B.T., Smith E.J., Anderson R.R., et al. Bame, Lion roars and nonoscillatory drift mirror waves in the magnetosheath. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, iss. A8. 6060. DOI: [10.1029/JA087iA08p06060](https://doi.org/10.1029/JA087iA08p06060).

Turner J.M., Burlaga L.F., Ness N.F., Lemaire J.F. Magnetic holes in the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, iss. 13. P. 1921–1924.

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., et al. Drop of solar wind at the end of the 20<sup>th</sup> century. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, JA029618. DOI: [10.1029/2021JA029618](https://doi.org/10.1029/2021JA029618).

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. Vol. 26, iss. 8. P. 1097–1100. DOI: [10.1029/1999GL900173](https://doi.org/10.1029/1999GL900173).

URL: <http://wso.stanford.edu/> (дата обращения 10 апреля 2023 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 15 марта 2023 г.).

URL: <https://www.obsebre.es/en/rapid> (дата обращения 15 декабря 2022 г.).

URL: [https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1/GINForms2](https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2) (дата обращения 12 апреля 2023 г.).

URL: [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public/](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/) (дата обращения 12 апреля 2023 г.).

#### Как цитировать эту статью:

Еселевич В.Г., Пархомов В.А. Роль альфа-частиц в проникновении диамагнитных структур солнечного ветра внутрь магнитосферы. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 12–23. DOI: [10.12737/szf-93202302](https://doi.org/10.12737/szf-93202302).