
**ДИАМАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ — ОСНОВА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО
МЕДЛЕННОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА****DIAMAGNETIC STRUCTURES AS A BASIS OF QUASI-STATIONARY
SLOW SOLAR WIND**

В.Г. Еселевич*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, esel@iszf.irk.ru***V.G. Eselevich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, esel@iszf.irk.ru*

Аннотация. Приведенные в данном обзоре результаты отражают основы современного понимания природы структур медленного солнечного ветра (СВ) на всем протяжении от Солнца до орбиты Земли. Известно, что источником медленного квазистационарного СВ на Солнце являются пояс и цепочки радиускорональных стримеров. Пояс стримеров охватывает все Солнце в виде волнообразной поверхности (юбки) и представляет собой последовательность пар лучей повышенной яркости (концентрации плазмы) или два близко расположенных ряда лучей. Нейтральная линия радиальной компоненты глобального магнитного поля Солнца проходит между лучами каждой из пар вдоль пояса. Продолжением пояса стримеров в гелиосфере является гелиосферный плазменный слой (ГПС). Более детальный анализ данных космических аппаратов Wind и IMP-8 показал, что участки ГПС на орбите Земли регистрируются как последовательность диамагнитных трубок с плазмой повышенной концентрации и пониженным значением межпланетного магнитного поля (ММП). Они являются продолжением лучей повышенной яркости пояса стримеров вблизи Солнца. Их угловой размер примерно сохраняется на всем пути от Солнца до орбиты Земли. Каждая диамагнитная трубка ГПС обладает тонкой внутренней структурой на нескольких масштабах, или фрактальностью. Другими словами диамагнитная трубка представляет собой набор вложенных друг в друга диамагнитных трубок, угловой размер которых может изменяться почти на два порядка. Этим последовательностям диамагнитных трубок, составляющих основу медленного СВ на орбите Земли, было дано более общее название — диамагнитные структуры (ДС). В заключительной части данной статьи дан сравнительный анализ нескольких событий, основанный на результатах этого обзора. Он позволил понять морфологию и природу происхождения нового термина «диамагнитные плазмоиды» СВ (локальные усиления плотности плазмы), который появился в ряде статей, опубликованных в 2012–2018 гг. Проведенный анализ впервые показал, что диамагнитные плазмоиды СВ, являются мелкомасштабной составляющей фрактальных ДС медленного СВ, рассмотренных в данном обзоре.

Ключевые слова: солнечный ветер, диамагнитные структуры, диамагнитные плазмоиды, цепочки стримеров.

Abstract. The results presented in this review reflect the fundamentals of the modern understanding of the nature of the structure of the slow solar wind (SW) along the entire length from the Sun to the Earth's orbit. It is known that the source of the slow quasi-stationary SW on the Sun is the belt and the chains of coronal streamers. The streamer belt encircles the entire Sun as a wave-like surface (skirt), representing a sequence of pairs of rays with increased brightness (plasma density) or two lines of rays located close to each other. Neutral line of the radial component of the solar global magnetic field goes along the belt between the rays of each of these pairs. The streamer belt extends in the heliosphere as the heliospheric plasma sheet (HPS). Detailed analysis of data from Wind and IMP-8 satellites showed that HPS sections on the Earth orbit are registered as a sequence of diamagnetic tubes with high density plasma and low interplanetary magnetic field. They represent an extension of rays with increased brightness of the streamer belt near the Sun. Their angular size remains the same over the entire way from the Sun to the Earth's orbit. Each HPS diamagnetic tube has a fine internal structure on several scales, or fractality. In other words, diamagnetic tube is a set of nested diamagnetic tubes, whose angular size can vary by almost two orders of magnitude. These sequences of diamagnetic tubes that form the base of slow SW on the Earth's orbit has a more general name — diamagnetic structures (DS). In the final part of this article, a comparative analysis of several events was made, based on the results of this review. He made it possible to find out the morphology and nature of the origin of the new term “diamagnetic plasmoids” SW (local amplifications of plasma density), which appeared in several articles published during 2012–2018. The analysis carried out at the end of this article, for the first time, showed that the diamagnetic plasmoids SW are the small-scale component of the fractal diamagnetic structures of the slow SW, considered in this review.

Keywords: solar wind, diamagnetic structures, diamagnetic plasmoids, streamer chain.

ВВЕДЕНИЕ

Квазистационарный и спорадический солнечный ветер (СВ) — это потоки СВ, для которых время жизни источников на Солнце соответственно больше (или много больше) и меньше суток. Квазистационарный медленный СВ в отсутствие спорадических потоков на орбите Земли характеризуется повышенной концентрацией плазмы $N > (10 \pm 2) \text{ см}^{-3}$ и относительно небольшой скоростью $V \approx 250\text{--}450 \text{ км/с}$ по сравнению с квазистационарным быстрым СВ, истекающим из корональных дыр, максимальная скорость которого $V \approx 450\text{--}800 \text{ км/с}$ [Borini et al., 1981; Eselevich, Fainshtein, 1991, 1992]. Источниками медленного СВ на Солнце являются пояс стримеров [Svalgaard et al., 1974] и цепочки стримеров [Eselevich et al., 1999; Eselevich et al., 2007], или псевдостримеры [Wang et al., 2007]). Механизм возникновения медленного СВ до сих пор остается неясным. Спорадический СВ связан с корональными выбросами массы (КВМ), природа которых также находится в стадии изучения.

В работе [Stansby, Horbury, 2018] на расстояниях, меньших или равных 0.5 а.е. от Солнца, по данным космического аппарата Helios в медленном СВ были зарегистрированы локальные концентрации плазмы $N > 50\%$ с одновременным уменьшением магнитного поля B (number density structures). Были проведены статистические исследования 140 таких структур. Они показали, что их пространственный размер составляет $\approx 50 \div 2000 \text{ Мм}$, что при средней скорости СВ $V \approx 400 \text{ км/с}$ соответствует временным масштабам $\approx 2 \div 80 \text{ мин}$. При этом полное давление (газодинамическое + магнитное) внутри и вне структур сохраняется, что обеспечивает их устойчивость.

В работах [Karlsson et al., 2012; Karlsson et al., 2015] на расстояниях 1 а.е. от Солнца в медленном СВ были зарегистрированы неоднородности плотности, названные авторами «диамагнитными плазмоидами СВ». Они идентифицировались как локальные повышения концентрации плазмы $N > 50\%$ при одновременном уменьшении модуля магнитного поля B и постоянной скорости V на масштабе $(0.1 \div 10)R_E$ (R_E — радиус Земли). Название «диамагнитный плазмод СВ» обусловлено антикорреляцией поведения N и B . Постоянство скорости внутри и вне плазмоедов означает, что они сносятся медленным СВ. Временной размер диамагнитных плазмоедов составляет около 5–10 мин [Karlsson et al., 2015], т. е. примерно согласуется с временными масштабами number density structures, зарегистрированных на расстояниях ≤ 0.5 а.е. и отмеченных выше [Stansby, Horbury, 2018].

В работе [Пархомов и др., 2017, Parkhomov et al., 2018] было введено понятие диамагнитных структур (ДС) для квазистационарного медленного СВ, текущего в поясе и цепочках стримеров. Оно имеет более широкий смысл, чем понятие диамагнитных плазмоедов. Основой введения этого определения послужили результаты статей [Еселевич, Еселевич, 2006а, б], в которых было показано, что пояс стримеров представляет собой последовательность лучей повышенной яркости (концентрации плазмы). В каждом из лучей наблюдаются повышение концен-

трации плазмы N и понижение модуля магнитного поля B , т. е. имеет место диамагнетизм лучей. Лучи сохраняют свой угловой размер $\approx 2\text{--}3^\circ$ вплоть до 1 а.е. Внутри лучей были зарегистрированы диамагнитные структуры меньших угловых размеров.

Главной задачей настоящей работы является проведение сравнительного анализа, основанного на результатах этого обзора, с целью выяснения природы происхождения термина «диамагнитный плазмод СВ», который появился в последнее десятилетие в ряде статей.

СТРУКТУРА ПОЯСА И ЦЕПОЧЕК СТРИМЕРОВ ОТ СОЛНЦА ДО ОРБИТЫ ЗЕМЛИ

Пояс и цепочки стримеров в белом свете видны как последовательность радиально ориентированных корональных лучей повышенной яркости. Это хорошо видно на рис. 1, где приведены типичные примеры распределений яркости белой короны с вычтенным фоном $\Pi(\Lambda, R) = P(\Lambda, R) - P_S(\Lambda, R)$, построен-

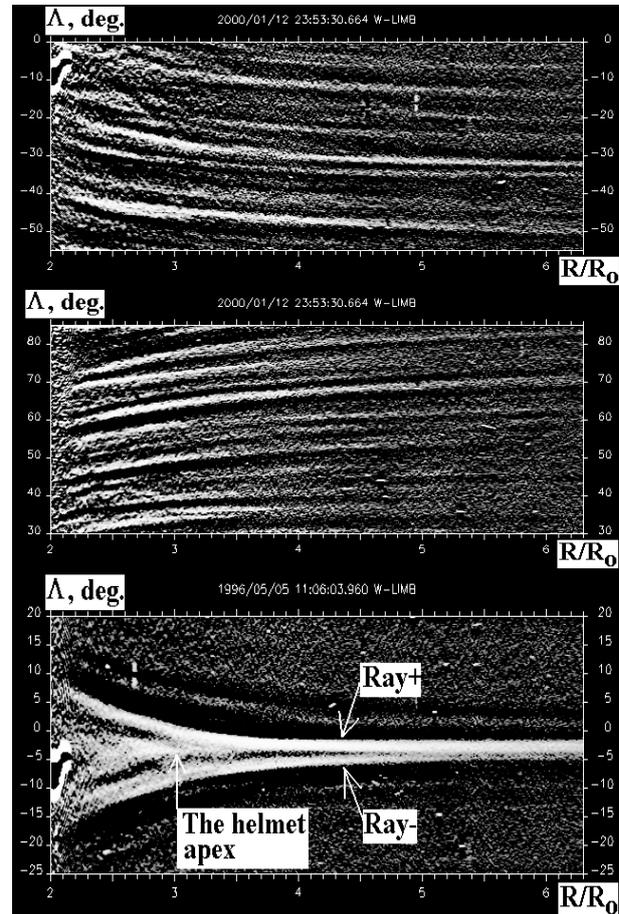


Рис. 1. Распределения яркости с вычтенным фоном $\Pi(\Lambda, R) = P(\Lambda, R) - P_S(\Lambda, R)$, представляющее собой усреднение $P(\Lambda, R)$ по угловому размеру $\delta\Lambda = 5^\circ$ в полярных координатах (Λ, R) в двух наиболее простых и характерных ситуациях: верхняя и средняя панели — участки пояса стримеров соответственно в северном и южном полушариях Солнца, расположенные почти в плоскости неба (12 декабря 2000 г., 20:31 UT), W-лимб; нижняя панель — участок пояса, перпендикулярный плоскости неба (5 мая 1996 г., 11:06 UT), W-лимб. Данные LASCO C2

ных по данным коронографа LASCO C2/SOHO для двух предельных наиболее простых случаев: 1) участок пояса стримеров вытянут вдоль широты Λ и расположен, практически, в картинной плоскости (рис. 1, верхняя и средняя панели, соответствующие северному и южному полушариям Солнца, для 12.01.2000); 2) участок пояса стримеров перпендикулярен картинной плоскости (нижнее изображение для 05.05.1996). В этих примерах фоновая яркость $P_s(\Lambda, R)$ представляет собой усреднение яркости $P(\Lambda, R)$ по угловому интервалу $\delta\Lambda=5^\circ$.

Особенности структуры пояса и цепочек стримеров от Солнца до Земли, основанные, в том числе, на анализе данных инструмента LASCO C2, представлены на рис. 2 и сводятся к следующему.

1. Пояс стримеров на расстояниях $R > 3R_\odot$ (R_\odot — радиус Солнца) от центра Солнца (т. е. выше вершины шлема, отмеченной как helmet apex на нижней панели) в отсутствие KBM представляет собой последовательность пар лучей (точнее, два близко расположенных ряда лучей) повышенной яркости. Угловой размер всех лучей примерно одина-

ков и составляет $d \approx 2-3^\circ$, расстояние между лучами вдоль пояса стримеров — $5-10^\circ$ [Еселевич, Еселевич, 2006a; Eselevich, Eselevich, 2006]. Здесь и далее угловой размер дается в гелиоцентрической системе координат. Последовательность этих лучей видна на верхней и средней панелях, а поперечное сечение этих двух рядов ($Ray+$ и $Ray-$), огибающих шлем с двух сторон на расстояниях $R < 3R_\odot$, — на нижней панели. Магнитное поле вдоль границы шлема представляет собой арку, два основания которой укоренены на фотосфере [Eselevich et al., 1999]. Яркости лучей в каждой паре в общем случае могут различаться, а направление магнитного поля в них противоположно. Это означает, что нейтральная линия (НЛ) радиальной компоненты глобального магнитного поля Солнца проходит по вершинам шлема вдоль пояса между лучами каждой из пар этих двух рядов. На рис. 2, а шлем показан последовательностью одиночных арок магнитного поля, по вершинам которых проходит НЛ. В общем случае поперечное сечение шлема может состоять из нечетного количества арок магнитного поля (одной или трех).

2. Радиальность лучей на расстояниях $10R_\odot > R > (4-5)R_\odot$ сохраняется с точностью $\pm 1.5^\circ$. Время жизни наиболее долгоживущих лучей может превышать 10 сут [Eselevich et al., 2001]. Квазистационарная, т. е. усредненная по колебаниям яркости белой короны с периодами менее суток, лучевая структура пояса стримеров существует всегда: она иногда разрушается под действием KBM и восстанавливается после этого в течение 1–2 сут [Shing, Hundhausen, 1986]. В поясе стримеров формируется и распространяется от Солнца квазистационарный медленный СВ.

3. Внутри пояса стримеров концентрация плазмы в лучах может превышать концентрацию плазмы между лучами на десятки процентов. В поперечном к плоскости пояса стримеров направлении N может падать в несколько раз [Howard et al., 1975].

4. Изображения белой короны из-за ограниченности пространственного разрешения современных коронографов не позволяют наблюдать внутреннюю структуру лучей повышенной яркости. Однако методом радиопросвечивания на расстояниях $(14-77)R_\odot$ внутри луча пояса стримеров с угловым размером 1.8° были обнаружены мелкомасштабные структуры размером до нескольких угловых минут [Woo et al., 1995].

5. Пояс стримеров охватывает все Солнце в виде волнообразной поверхности (юбки) (рис. 2, в). В минимуме активности поверхность пояса близка к плоскости солнечного экватора и имеет с ним несколько точек пересечения (две или четыре).

Продолжение пояса стримеров в гелиосферу (медленный СВ) еще называют гелиосферным плазменным слоем (ГПС) [Winterhalter et al., 1994]. НЛ пояса стримеров внутри ГПС на орбите Земли проявляется в виде секторной границы ММП (показано стрелкой от рис. 2, а к б с надписью sec), разделяющей протяженные области (порядка десятков градусов в гелиоцентрической системе координат или, соответственно, нескольких суток) СВ с противо-

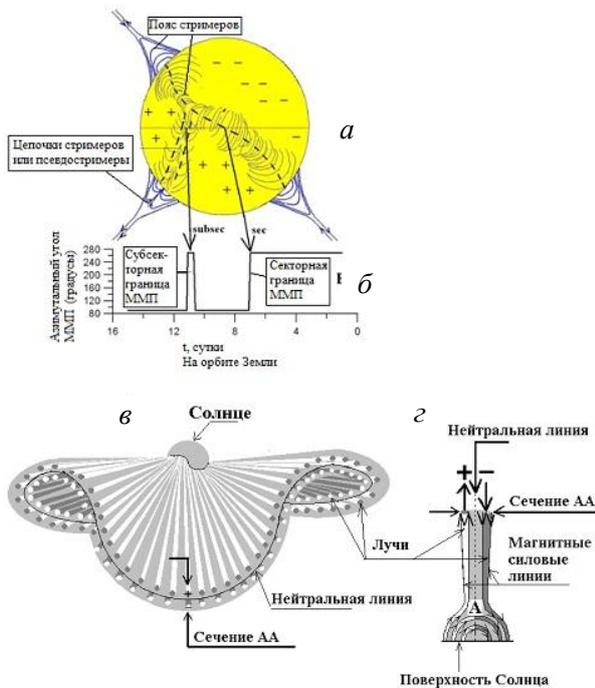


Рис. 2. — Схема силовых линий магнитного поля в основаниях пояса и цепочек корональных стримеров, разделяющих области на поверхности Солнца соответственно с противоположной и одинаковой направленностью радиальной компоненты глобального магнитного поля Солнца (а). Одиночная штриховая линия — нейтральная линия (НЛ) радиальной компоненты магнитного поля, проходящая по вершинам арок, двойная штриховая линия — две нейтральные линии вдоль сдвоенных арок магнитного поля в основании цепочек стримеров; б — схема распределения азимутального угла межпланетного магнитного поля (ММП) на орбите Земли при вращении Солнца вдоль горизонтальной линии (эклиптики) (см. а); в — лучевая структура пояса корональных стримеров в пространстве; г — поперечное сечение (AA) пояса стримеров. В светлых лучах с темным поперечным сечением ряда выше НЛ пояса стримеров магнитное поле направлено от Солнца (+), в темных лучах с темным сечением ряда ниже НЛ — к Солнцу (–). Сплошная линия — нейтральная линия между лучами.

ложными знаками ММП [Korzhov, 1977]. Положительное направление от Солнца соответствует значениям азимутального угла $\Phi < 180^\circ$, отрицательное — $\Phi > 180^\circ$. Поэтому число изменений знака ММП (если оно больше единицы) в структуре секторной границы является нечетным.

6. Цепочки стримеров (или псевдостримеры) в короне в белом свете выглядят, подобно поясу стримеров, как последовательность пар лучей повышенной яркости (плотности). В них медленный СВ имеет примерно те же свойства, что и в поясе стримеров. Однако цепочки отличаются от пояса тем, что разделяют в короне области с открытыми магнитными силовыми линиями, имеющими одинаковую полярность поля. Поэтому поперечное сечение шлема, расположенного в основании цепочек стримеров, представляет собой две арки (в общем случае — четное число арок) [Eselevich et al., 1999]. Последовательности вершин этих пар арок показаны двумя параллельными пунктирными кривыми на рис. 2, а.

7. На орбите Земли цепочки стримеров регистрируются в виде участков с повышенной концентрацией плазмы, содержащих внутри себя четное число изменений знака ММП, которые называют субсекторными границами (показано стрелкой с надписью subsec на рис. 2, а, б) [Ivanov et al., 2002].

8. В ГПС сохраняются угловые размеры и относительные изменения концентрации, наблюдаемые вблизи Солнца в лучевых структурах пояса стримеров [Еселевич, Еселевич, 2006а, б]. На орбите Земли ГПС характеризуется следующими параметрами и особенностями [Borini et al., 1981; Еселевич, Еселевич, 2006б]:

- относительно небольшая и почти постоянная по слою скорость СВ $V \approx (250 \div 450)$ км/с;
- пониженная протонная температура $T_p < 10^5$ К;
- повышенная концентрация плазмы с максимальными значениями $N_{\max} > (10 \pm 2)$ см⁻³;
- антикорреляция изменения плотности $N(t)$ и модуля магнитного поля $B(t)$ на временных масштабах, по крайней мере, порядка часов и менее;
- наличие одного или нескольких изменений знака ММП, являющихся проявлением секторной границы или ее структуры (в случае цепочек стримеров число изменений знака ММП четное, т. е. секторная граница на орбите Земли отсутствует).

Присутствие всех этих признаков обязательно для однозначного определения медленного СВ, текущего в ГПС на орбите Земли.

Поскольку ГПС является квазистационарной структурой, вращающейся вместе с Солнцем, на орбите Земли для нее имеет место следующая связь времени и угловых размеров: $1 \text{ сут} \approx 13.3^\circ$.

По аналогии с [Еселевич, Еселевич, 2006б] введем понятие горизонтального и наклонного участка ГПС. Оно определяется по величине угла наклона λ соответствующего ему вблизи Солнца участка НЛ радиальной компоненты глобального магнитного поля относительно линии солнечного экватора. Для построения профиля НЛ, рассчитанной в потенциальном приближении на расстоянии $R = 2.5R_\odot$ от центра Солнца, использовались данные [<http://wso.stan-ford.edu>]. Участок ГПС, составляю-

щий с плоскостью эклиптики угол $\lambda < 10^\circ$, назовем горизонтальным, а с $\lambda > 10^\circ$ — наклонным. Горизонтальный участок ГПС испытывает минимальные искажения при движении составляющего его медленного СВ от Солнца к Земле, так как он не сталкивается с быстрым СВ, истекающим из корональных дыр. В то же время наклонный участок ГПС из-за столкновения с быстрым СВ часто бывает подвержен дополнительному сжатию (в нем усиливается концентрация плазмы и магнитное поле), тем более сильно, чем больше λ [Eselevich, Fainshtein, 1991].

Изложенная картина соответствия участков ГПС на 1 а.е. их источникам на Солнце более детально была рассмотрена в [Eselevich et al., 1999; Еселевич, Еселевич, 2006а, б]. Это дает возможность перехода к обоснованию ДС как основы медленного СВ. С этой целью проведем анализ пространственной структуры ГПС на орбите Земли с использованием данных с высоким временным разрешением, полученных на двух космических аппаратах: Wind и IMP-8. При измерении ММП на Wind оно составляет ≈ 3 с, на IMP-8 — ≈ 12 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПРИХОДА НА ОРБИТУ ЗЕМЛИ СТРУКТУР ПОЯСА СТРИМЕРОВ

Момент времени T_{orb} прихода на орбиту Земли данного участка пояса стримеров вблизи Солнца, если этот участок наблюдается на западном лимбе в момент времени T_W или на восточном лимбе в момент времени T_E , определялся по формулам

$$T_{\text{orb}} = T_W - 7 \text{ сут} + \Delta T; T_{\text{orb}} = T_E + 7 \text{ сут} + \Delta T, \quad (1)$$

где

$$T_W - 7 \text{ сут} \approx T_E + 7 \text{ сут} \quad (2)$$

— момент времени, когда данный участок пояса стримеров проходит через центральный меридиан.

Здесь 7 сут — это время движения рассматриваемого участка от лимба до центрального меридиана (или наоборот).

Величина ΔT [Еселевич, Еселевич, 2006б], определяемая формулой

$$\Delta T (\text{ч}) = (4.6 \cdot 10^4) / V (\text{км/с}), \quad (3)$$

есть время пролета медленного СВ от Солнца до орбиты Земли, V — скорость СВ на орбите Земли. Для $V = 350$ км/с $\Delta T \approx 5.5$ сут. За 1996–1999 гг. было проанализировано около четырех десятков участков квазистационарного медленного СВ, которые на орбите Земли характеризовались параметрами и особенностями, перечисленными выше. Для всех $V = 350$ км/с с точностью до нескольких десятков км/с. Поэтому при расчетах T_{orb} везде полагалось $\Delta T = 5.5$ сут.

ВЫБОР И АНАЛИЗ СОБЫТИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ (ПРОСТРАНСТВЕННЫХ) МАСШТАБАХ

В качестве исследуемых событий по данным измерений параметров СВ на орбите Земли в соответ-

ствии с требованиями, перечисленными выше, выбирались участки ГПС в отсутствие спорадических потоков СВ. Соответствие выбранного участка ГПС поясу стримеров у поверхности Солнца на E- или W-лимбах находилось с помощью формул (1)–(3) в предположении, что параметры СВ рассматриваемого участка пояса стримеров мало меняются в течение $\approx 12\text{--}14$ сут.

Событие 4 сентября 1996 г. (день 248)

Этому участку вблизи Солнца соответствует наклонный участок пояса стримеров с $\lambda > 10^\circ$. На рис. 3 показаны концентрация $N(t)$ и скорость $V(t)$ плазмы СВ, параметры ММП, усредненные за 60 с: модуль $B(t)$, его компоненты $B_x(t)$, $B_y(t)$, $B_z(t)$ и азимутальный угол $\Phi(t)$. На профиле $\Phi(t)$ в момент $t \approx 9$ ч видна простая секторная граница, соответствующая изменению угла Φ от $\approx 135^\circ$ до $\approx 315^\circ$, что равносильно изменению знака радиальной компоненты ММП от «+» (от Солнца) к «-» (к Солнцу). В общем случае секторная граница может быть сложной и состоять из нечетного количества изменений знака ММП.

Возникает вопрос: здесь имеют место колебания N и V во времени или регистрируются квазистатические движущиеся пространственные структуры? Прежде всего, заметим, что в замагниченной плазме возможны колебания магнитного поля двух основных типов, которые при развитии неустойчивости уносят большую часть энергии: альфвеновские

и магнитозвуковые. В альфвеновских колебаниях $N = \text{const}$, V изменяется, в магнитозвуковых $N(t)$ коррелирует с $B(t)$. На профиле $N(t)$ просматриваются два горба плотности (участки АВ и CD на верхней панели рис. 3 с различными максимальными значениями N , имеющие угловой размер $d \approx 1.5^\circ\text{--}1.8^\circ$). Они имеют внутреннюю более мелкомасштабную структуру. На границах этих горбов (показаны вертикальными штриховыми линиями) модуль B резко возрастает, а N уменьшается. Наблюдается антикорреляция $B(t)$ и $N(t)$. Коэффициент антикорреляции на временном интервале 2.5–10.8 ч составляет $K \approx -0.81$. Не просматривается какая-либо заметная корреляция или антикорреляция между $N(t)$ и $B_x(t)$, $B_y(t)$, $B_z(t)$. Скорость V практически постоянна (с точностью не хуже, чем $\pm 10\%$ на рассматриваемом отрезке времени).

В косых волнах ситуация промежуточная. Так как в нашем случае $N(t)$ антикоррелирует с $B(t)$, это не колебания замагниченной плазмы, а распространяющиеся от Солнца пространственные структуры.

Прямым доказательством может служить сравнение одновременных измерений на двух разнесенных в пространстве КА Wind и IMP-8 (рис. 4). Для рассматриваемого события 4 сентября 1996 г. средние координаты (в единицах радиуса Земли) КА относительно центра Земли были следующие: для Wind $x \approx 100$, $y \approx 0$; $z \approx 24$; для IMP-8 $x \approx 24$, $y \approx -27$, $z \approx -6$. Сравнение проведем для первого пика N (участок АВ

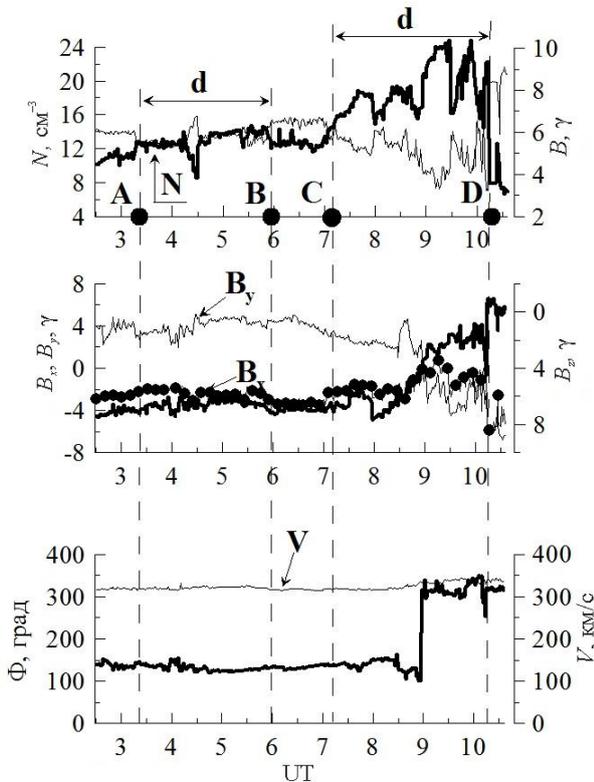


Рис. 3. Параметры солнечного ветра в зависимости от времени 4 сентября 1996 г. (день 248) по данным космического аппарата Wind. Верхняя панель — концентрация плазмы $N(t)$ (жирная кривая), модуль ММП B (тонкая кривая); средняя панель — B_x , B_y , B_z ; нижняя панель — азимутальный угол ММП Φ (жирная кривая), скорость плазмы солнечного ветра V . N , V и B даны примерно с минутным разрешением

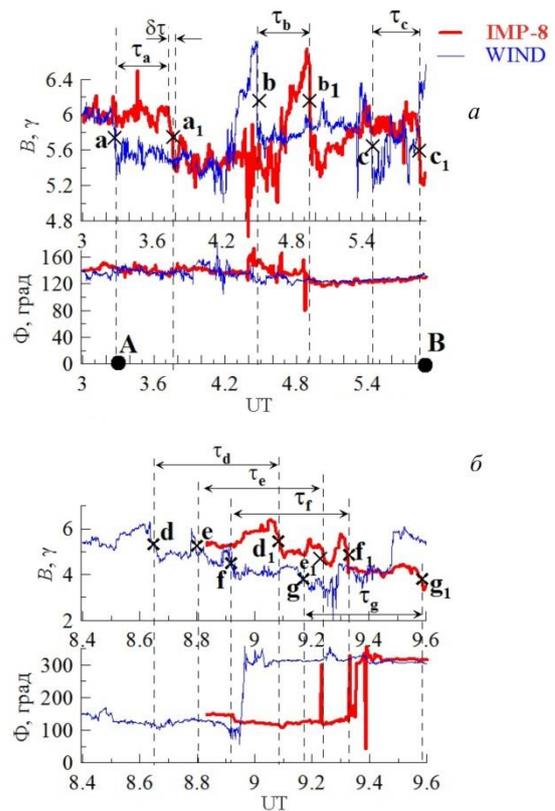


Рис. 4. Модуль B (верхние панели) и азимутальный угол Φ (нижние панели) магнитного поля по измерениям 4 сентября 1996 г. (день 248) двух разнесенных в пространстве космических аппаратов Wind (тонкие кривые) и IMP8 (толстые кривые): а — для участка АВ на рис. 1; б — для части участка CD на рис. 3

на рис. 3) и части второго пика N (части участка CD, так как не для всего CD есть данные IMP-8) на примере магнитного поля B , поскольку оно регистрируется с наилучшим временным разрешением (на Wind ≈ 3 с, на IMP-8 ≈ 12 с). В качестве характерных точек, по которым исследуется движение структур между двумя КА, выберем средние точки токовых слоев (скачков магнитного поля): a и a_1 , b и b_1 , c и c_1 , d и d_1 (рис. 4, a , верхняя панель) и e и e_1 , f и f_1 , g и g_1 (рис. 4, b , верхняя панель). Появление этих слоев в сигнале IMP-8 задерживается по отношению к моменту времени регистрации на Wind на $\tau \approx 25\text{--}28$ мин. Значения азимутального угла Φ на участках, следующих за каждым из слоев, практически не меняются при движении от КА Wind к IMP-8 (рис. 4, a , b , нижние панели). При этом характерные временные масштабы δt рассматриваемых скачков магнитного поля (показано на рис. 4, a , верхняя панель), минимальный размер которых может достигать доли минуты, мало меняются за время $t \gg \delta t$, т. е. мы имеем дело с распространением квазистатических структур. Поскольку токовые слои ограничивают участки с повышенной плотностью и пониженным магнитным полем (см., например, участки d на рис. 3), мы имеем дело с магнитными трубками: диамагнитный ток на их поверхности приводит к понижению поля внутри трубок. Это согласуется с выводами о том [Еселевич, Еселевич, 2006а, б], что структуры внутри ГПС являются проявлением лучей повышенной яркости (магнитных трубок) пояса корональных стримеров вблизи Солнца. При этом угловой размер лучевых структур пояса стримеров при движении от Солнца до орбиты Земли сохраняется, что говорит об их квазистационарности на участке пути ≈ 150 млн. км.

Антикорреляция $N(t)$ и $B(t)$ при отсутствии заметной антикорреляции $N(t)$ с отдельными компонентами ММП в ГПС свидетельствует в пользу того, что эти магнитные трубки вытянуты вдоль направления \mathbf{V} . Как отмечалось выше, ослабление поля B внутри трубок является отражением диамагнетизма высокопроводящей замагниченной плазмы с неоднородными границами [Франк-Каменецкий, 1968]. Причина диамагнетизма — диамагнитный (или дрейфовый) ток на граничных поверхностях трубок, который уменьшает поле B внутри трубки. В случае равновесия в направлении, перпендикулярном \mathbf{V} , должно сохраняться полное давление $P = N(T_e + T_p) + B^2/8\pi$. Сохранение полного давления в ГПС ранее уже отмечалось в работе [Winterhalter и др., 1994]. Как будет показано далее, в большинстве случаев на различных участках ГПС это условие выполняется (для рассматриваемого события нет данных о T_e).

В то же время, согласно [Schwenn, March, 1991], в ГПС имеет место развитая альфвеновская турбулентность. Существование квазистатических структур при ее наличии, по-видимому, можно объяснить тем, что уровень турбулентных альфвеновских колебаний $(\Delta B/B)_T$ много меньше модуля магнитного поля в квазистатических структурах ГПС $(\Delta B/B)_K \sim 150\text{--}200\%$. Турбулентные колебания, возможно, играют роль слабых эффективных соуда-

рений, не оказывающих существенного влияния на квазистатические структуры.

Удивительным свойством магнитных трубок в ГПС является наличие внутри них тонкой структуры на нескольких пространственных масштабах.

Действительно, рассмотрим магнитную трубку АВ (обозначение см. на рис. 3) с угловым размером $d \approx 1.5^\circ$ на более растянутой шкале времени (рис. 5, верхняя панель). Она, в свою очередь, состоит из двух трубок с угловым размером $d_1 \approx 0.5^\circ\text{--}0.7^\circ$ и одной трубки с $d_2 \approx 0.23^\circ$. Последняя трубка состоит из двух трубок с $d_3 \approx 0.07^\circ$. Такая же антикорреляция между $N(t)$ и $B(t)$ просматривается и на еще меньшем масштабе $d_4 \approx 0.03^\circ$ (рис. 5, верхняя панель). Аналогичная ситуация имеет место и на участке CD (рис. 5, нижняя панель). На нем трубка с $d \approx 1.5^\circ$ содержит внутри четыре трубки с $d_2 \approx 0.2^\circ\text{--}0.3^\circ$. При этом, по крайней мере, одна из них (последняя с $d_2 \approx 0.2^\circ$) состоит из трех трубок с $d_3 \approx 0.05^\circ\text{--}0.07^\circ$. Как показано выше, перечисленные трубки различных масштабов распространяются от Солнца с примерно одинаковыми скоростями, составляя единую структуру ГПС.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о явлении самоподобия (о подобии геометрии трубок см. ниже), присущего фрактальным образованиям [Milovanov, Zelenyi, 1994, 1999], а именно, свойства магнитных силовых трубок, соответствующих минимальному угловому размеру $d_4 \approx 0.03^\circ$ (рис. 5, верхняя панель), такие же, как и для трубок с масштабом $d \approx 1.5^\circ\text{--}1.8^\circ$, т. е. они сохраняются при изменении масштаба примерно в 50–60 раз.

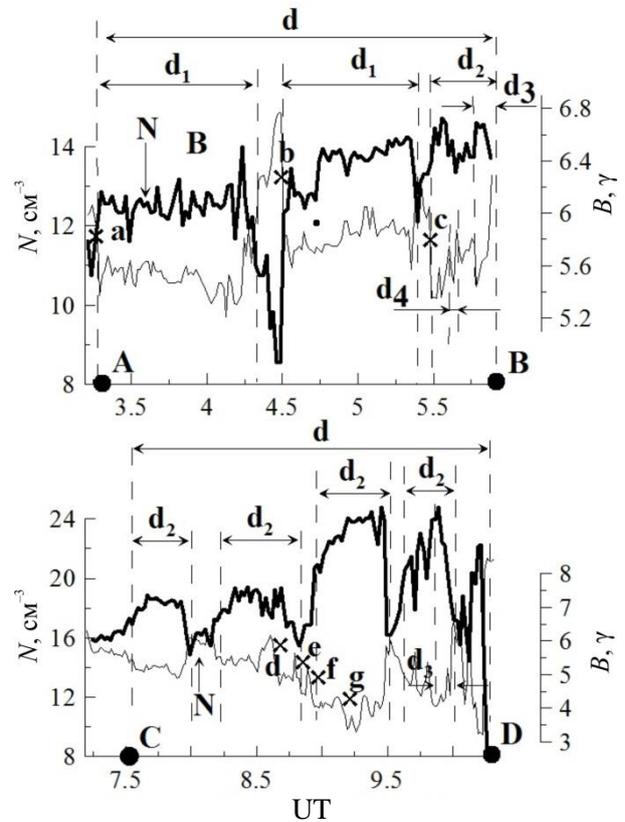


Рис. 5. Те же данные, что на рис. 3 (верхняя панель) для участков дня 4 сентября 1996 г. (день 248) на более растянутой шкале времени: вверху — участок АВ, внизу — участок CD. Временное разрешение 3 с

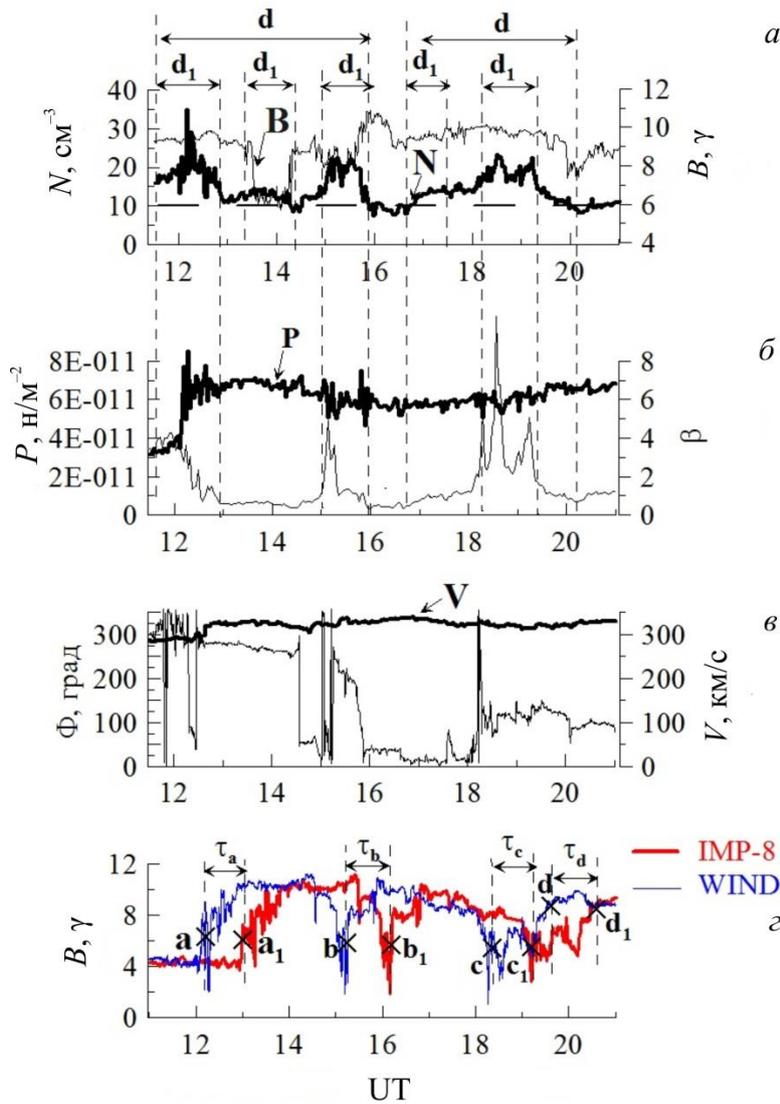


Рис. 6. Параметры СВ в зависимости от времени 15 июня 1999 г. (день 166): *a* — концентрация плазмы $N(t)$ (жирная кривая), модуль B (тонкая кривая) с временным разрешением ≈ 1 мин; *б* — полное давление $P = N(T_e + T_p) + B^2/8\pi$ (жирная кривая) и $\beta = 8\pi[N(T_e + T_p)] / B^2$ (тонкая кривая) с временным разрешением ≈ 2.5 мин; *в* — азимутальный угол Φ (тонкая кривая) и скорость СВ V (сплошные кружки) с временным разрешением ≈ 1 мин по данным КА Wind; *г* — модуль магнитного поля B по измерениям на двух разнесенных в пространстве космических аппаратах Wind (тонкая кривая, разрешение ≈ 3 с) и IMP-8 (жирная кривая, разрешение ≈ 15 с)

При этом под свойствами трубок на различных пространственных масштабах понимаются (на примере 4 сентября 1996 г.) следующие:

- диамагнетизм (антикорреляция между возрастанием $N(t)$ и уменьшением $B(t)$);
- квазистатичность, по крайней мере, в течение времени их движения между КА Wind и IMP-8;
- примерное сохранение в направлении, перпендикулярном \mathbf{B} , полного давления $P = N(T_e + T_p) + B^2/8\pi$.
- повышенное значение $\beta = 8\pi N(T_e + T_p) / B^2$ внутри трубок по сравнению с окружающей их плазмой.

Для 4 сентября 1996 г. два последних свойства невозможно проверить из-за отсутствия данных по электронной температуре T_e .

Поэтому рассмотрим участок ГПС на орбите Земли во второй половине 15 июня 1999 г. (день 166), для которого есть данные о T_e . Этому событию

вблизи Солнца соответствует участок пояса стримеров, пересекающий плоскость эклиптики почти вертикально (см. нейтральную линию на синоптической карте CR 1950 [<http://wso.stan-ford.edu>] на долготе $210^\circ - 220^\circ$ (9–10 июня 1999 г.)). На рис. 6, *a*, видно, что $B(t)$ и $N(t)$ изменяются в противофазе ($K \approx -0.8$). Наблюдаются две области повышенной концентрации $N_{\max} > 10 \text{ см}^{-3}$ с угловыми размерами $d \approx 2.5^\circ$ и $d \approx 1.7^\circ$. Между областями проходит сложная (с несколькими изменениями знаков ММП) секторная граница в конце 15 июня (рис. 6, *в*). $B(t)$ и $N(t)$ изменяются в противофазе (коэффициент антикорреляции $K \approx -0.8$). Скорость V (черные кружки) практически постоянна на всем рассматриваемом интервале. Внутри этих областей просматривается более мелкокомасштабная структура (пики $N_{\max} > 10 \text{ см}^{-3}$) с характерным угловым размером $d_1 \approx 0.6^\circ - 0.8^\circ$. Внутри пиков с размером d_1 наблюдаются пики с размером $d_2 \approx 0.15^\circ - 0.20^\circ$,

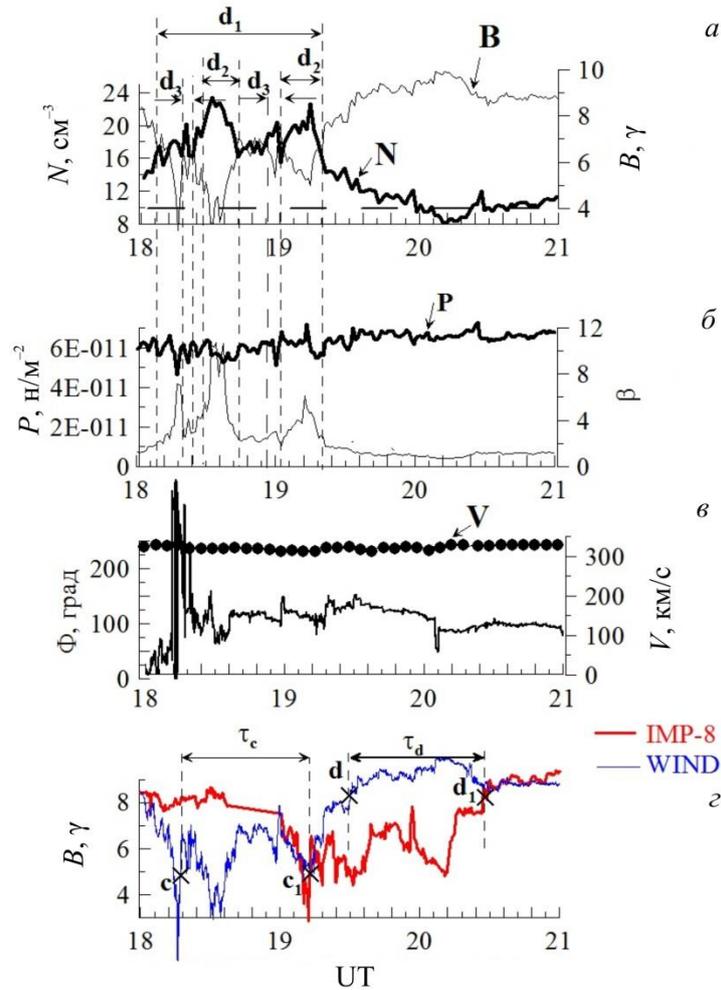


Рис. 7. Те же данные, что на рис. 6, для части дня 15 июня 1999 г. (день 166) на более растянутом временном масштабе. Данные на панелях а, б и скорости V на (в) нанесены с временным разрешением ≈ 1 мин, все остальные — с разрешением ≈ 15 с

а внутри последних — пики с $d_3 \approx 0.03^\circ - 0.04^\circ$. Это следует из рис. 7, а, на котором область с $d \approx 1.7^\circ$ дана на более растянутом временном масштабе. Для каждого из пиков любого указанного углового размера d_n $B(t)$ и $N(t)$ изменяются в противофазе (рис. 6, а и 7, а), величина β в области пиков N заметно, а часто в разы превышает его значения вне пиков (рис. 6, б и 7, б, тонкая линия).

Полное давление $P = N(T_e + T_p) + B^2/8\pi$, усредненное по колебаниям с периодом $\tau \leq 10$ мин, внутри и вне пиков мало меняется (рис. 6, б и 7, б, жирная кривая). На всем рассматриваемом интервале на масштабе пиков с угловым размером $d \approx 1.7^\circ - 2.5^\circ$ полное давление также сохраняется с точностью, не хуже, чем $\pm 15\%$.

Токовые слои, связанные с границами наиболее крупных пиков $N_{\max} > 10 \text{ см}^{-3}$, обозначены буквами а, б, с, d и а₁, б₁, с₁, d₁ при регистрации на КА Wind и IMP-8 соответственно (рис. 6, г и 7, г). Времена задержки прохождения этих структур между КА $\tau_a \approx 58$ мин, $\tau_b \approx 53$ мин, $\tau_c \approx 54$ мин, $\tau_d \approx 52$ мин, т. е. близки по величине. Это означает, что весь набор структур движется как единое образование примерно с одной скоростью. Все это свидетельствует о

том, что пики $N_{\max} > 10 \text{ см}^{-3}$ с угловыми размерами d , d_1 , d_2 , d_3 и т. д. являются диамагнитными трубками, причем трубки меньшего размера заполняют трубки большего размера.

Выделенные на приведенных двух примерах характерные особенности поведения параметров ГПС на орбите Земли обнаруживаются, в той или иной степени, на любом участке ГПС в отсутствие спорадических потоков. Этот вывод сделан по результатам рассмотрения около 40 событий 1996–1999 гг. Здесь следует отметить, что для понятия фрактальности важным является самоподобие вложенных диамагнитных трубок. Покажем это для исследованных участков ГПС путем следующих рассуждений.

Пусть большая диамагнитная трубка заполнена диамагнитными трубками меньших поперечных размеров. Большую и маленькие трубки можно считать самоподобными, если их поперечные сечения по форме одинаковы и близки кругу. В пользу того, что в нашем случае это должно быть так, свидетельствуют следующие положения.

1. Углы наклона в 40 исследованных участках ГПС по отношению к плоскости эклиптики были разными. Это означает, что магнитные трубки пересе-

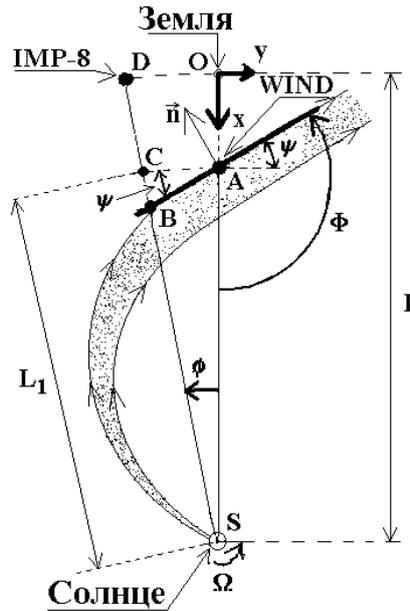


Рис. 8. Сечение плоскостью эклиптики пояса стримеров и его продолжения в гелиосфере

кались КА под разными произвольными углами. И все они дали примерно один и тот же результат: угловые размеры вложенных друг в друга магнитных трубок меняются от $d \approx 1.5^\circ - 3.0^\circ$ до минимальных размеров $d \approx 0.03^\circ - 0.06^\circ$ (рис. 5, верхняя панель). Это означает, что поперечные сечения трубок близки кругу.

2. Общие физические соображения: маловероятно, чтобы сечения диамангнитных трубок были в виде эллипса или любой другой фигуры.

СХЕМА ПОЛОЖЕНИЯ ДИАМАГНИТНЫХ ТРУБОК В ГЕЛИОСФЕРЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ИХ ДВИЖЕНИЯ ОТ СОЛНЦА

На основании изложенного в предыдущем параграфе сечение пояса стримеров и его продолжения в гелиосфере плоскостью эклиптики схематично может быть представлено в виде сечения плоскостью эклиптики диамангнитной трубки, содержащей движущуюся плазму повышенной по отношению к окружающей плазме концентрации. Вблизи Солнца трубка ориентирована радиально, а по мере удаления от него постепенно изгибается в направлении против вращения Солнца. Ее угловой размер d остается примерно постоянным на всем протяжении от Солнца до Земли. Очевидно, что на любом расстоянии от Солнца трубка ориентирована вдоль силовых линий ММП, которые ее образуют (кривые линии со стрелками, ограничивающие область с точками на рис. 8). Поэтому на орбите Земли угол наклона оси трубки к направлению оси OX так же, как линия ее переднего фронта (жирная линия АВ на рис. 8), будет равен азимутальному углу Φ линий ММП. Из-за повышенной концентрации плазмы внутри трубка представляет собой пространственную неоднородность по отношению к окружающей ее плазме. При этом плазма СВ движется радиально везде в плоско-

сти эклиптики как в области неоднородности, так и вне ее. Квазистационарная картина такого радиального течения СВ с пространственными неоднородностями в распределении концентрации плазмы в плоскости эклиптики вращается вместе с Солнцем и имеет на орбите Земли линейную скорость $V_0 = 2\pi L/T = 2\pi 215R_\odot/T \approx 405$ км/с, $T \approx 27$ сут. Учитывая наличие этих двух независимых движений в плоскости эклиптики, получим формулы для вычисления угла Φ_C наклона фронта АВ трубки с плазмой медленного СВ, имеющего на орбите Земли скорость V , и время задержки τ_C прохождения фронтом АВ КА Wind (точка А) и IMP-8 (точка D), указанных на рис. 8.

Пусть в момент времени $t_0=0$ источник плазмы медленного СВ находился на центральном меридиане Солнца ($\varphi=0^\circ$). Частицы плазмы, вылетающие из источника в этот момент, будут двигаться радиально вдоль линии SA (или OX). В момент времени $t \ll T$ из-за вращения Солнца источник медленного СВ будет располагаться относительно центрального меридиана под углом $\varphi \ll 360^\circ$. Испускаемые им частицы будут двигаться радиально вдоль линии SB. Из геометрии картины на рис. 8 следует, что

$$\tau_c \approx \frac{\varphi T}{2\pi} + \frac{L-L_1}{V} \approx \frac{y-y_1}{V_0} + \frac{x-x_1}{V}. \quad (1)$$

Здесь было учтено, что $\Phi = 2\pi(y-y_1)/L$, где x, y и x_1, y_1 — координаты (с учетом знака) положений КА IMP-8 (точка D) и Wind (точка A) соответственно.

Угол ψ наклона фронта АВ относительно линии AC (рис. 8) с учетом неравенства $L-L_1 \ll L$ определяется формулой:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{CB}{CA} \approx \frac{\varphi TV}{2\pi \varphi L} = \frac{V}{V_0}. \quad (2)$$

Искомый азимутальный угол Φ_C связан с углом ψ соотношениями

$$\Phi_C = 90^\circ + \psi, \text{ если } \Phi_C < 180^\circ, \quad (3)$$

$$\Phi_C = 270^\circ + \psi, \text{ если } \Phi_C > 180^\circ. \quad (4)$$

Поскольку для ГПС на орбите Земли $V \approx 350$ км/с ± 50 км/с, для квазистационарной диамагнитной трубки угол $\Phi_C \approx 130^\circ \pm 5^\circ$, либо $\Phi_C \approx 310^\circ \pm 5^\circ$.

Для проверки изложенной выше картины сопоставим рассчитанные величины τ_C , Φ_C с измеренными τ_m , Φ_m . Проведем это сравнение на примере уже рассмотренного события 4 сентября 1996 г.

Измеренные значения Φ_m (для токового слоя а $\Phi_m = \Phi_a$, для токового слоя б $\Phi_m = \Phi_b$ и т. д.) находились по формуле $\Phi_m = (\Phi + \Phi_1)/2$, где Φ и Φ_1 — усредненные значения азимутального угла по интервалу времени 3 мин непосредственно перед прибытием токового слоя на КА Wind и IMP-8 соответственно. Обычно Φ и Φ_1 близки по величине. На верхних панелях рис. 4, а, б местоположения токовых слоев отмечены крестиками с соответствующей буквой. Время движения слоя между двумя КА обозначены τ с индексом, соответствующим букве слоя. В качестве V бралась средняя величина скорости СВ на пути движения каждого из слоев между двумя КА. Измеренные V , τ_m , Φ_m приведены в столбцах 9, 10, 12 таблицы. Результаты рассчитанных значений τ_C , Φ_C по формулам (1)–(4) для средних точек токовых слоев (скачков магнитного поля), регистрируемых последовательно на Wind и IMP-8 (с индексом 1): а и а₁, б и б₁, с и с₁, d и d₁, e и e₁, f и f₁, g и g₁ на рис. 4, а, б приведены в столбцах 11 и 13 таблицы.

Для рассматриваемого интервала времени координаты Wind (столбцы 3–5 таблицы) и IMP-8 (столбцы 6–8) были соответственно

$$\text{Wind: } x \approx 100R_E, y \approx 0, z \approx -3R_E;$$

$$\text{IMP-8: } x \approx 24R_E, y \approx -27R_E, z \approx -6R_E, \Phi_m = \Phi_a.$$

Подставляя координаты спутников и значения V и V_0 для точек а–g в формулы (1)–(4), находим рассчитанные значения τ_C и Φ_C для рассматриваемых слоев, приведенные в столбцах 11 (τ_C) и 13 (Φ_C). Результаты хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями. При этом среднее время задержки для всех семи слоев $\tau_a \approx 25 \pm 1.3$ мин. Таким образом, с точностью $\approx 5\%$ скорость всех слоев оказывается одинаковой, т. е. вся фрактальная структура распространяется как единое образование.

Аналогичным способом исследовано 18 событий (см. таблицу). Отношения τ_m/τ_C в зависимости от нормированного расстояния между КА R/R_E показаны на рис. 9.

Средние арифметические отклонения от линий $\tau_m/\tau_C = 1$ и $\Phi_m/\Phi_C = 1$ составляют соответственно $\approx 15\%$ и $\approx 5\%$. Таким образом, предложенная выше картина распространения квазистационарной диамагнитной трубки с плазмой в СВ неплохо согласуется с экспериментом.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ТОКА НА ГРАНИЦАХ ДИАМАГНИТНЫХ ТРУБОК

Как уже отмечалось выше, на границах диамагнитных трубок существует скачок модуля магнит-

ного поля δB на пространственном масштабе Δ , а значит существует связанный с ним диамагнитный (или дрейфовый) ток. На рис. 10 показаны два примера таких скачков для двух различных событий: 4 сентября 1996 и 18 июня 1998 г.

Остановимся более подробно на последнем событии, для которого известны все необходимые параметры в области скачка (точка С): $V \approx 350$ км/с, $\Phi \approx 300^\circ$, $\psi \approx 30^\circ$, $T_e \approx 1.4 \cdot 10^5$ К, $T_p \approx 3 \cdot 10^4$ К, $N \approx 30$ см⁻³, $B \approx 11\gamma = 1.1 \cdot 10^{-4}$ Г. Прежде всего, оценим толщину токового слоя Δ , зная его временную ширину δt . Величина $\Delta \approx V \cos \psi \delta t \approx 912$ км. Сравним Δ с величиной ионного ларморовского радиуса $\rho_i \approx v_{ip}/\omega_{ip}$. Най-

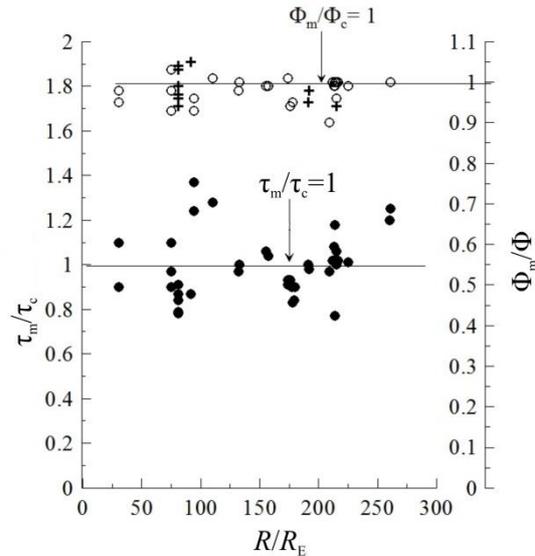


Рис. 9. Отношения τ_m/τ_C (сплошные кружки) и Φ_m/Φ_C (светлые кружки — для $\Phi_m > 180^\circ$, крестики — для $\Phi_m < 180^\circ$) в зависимости от нормированного расстояния R/R_E между КА

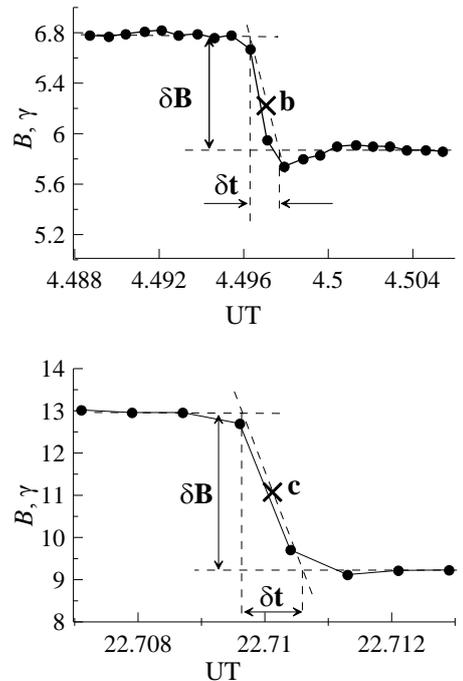


Рис. 10. Примеры скачков магнитного поля B с максимальным временным разрешением (точки на графике нанесены с интервалом три секунды) для двух событий на орбите Земли по данным Wind: 4 сентября (день 248) 1996 г. (вверху); 18 июня (день 169) 1998 г. (внизу)

День	t_0 , часы	Координаты местоположения КА						V, км/с	τ_m , мин	τ_c , мин	Φ_m , град	Φ_c , град
		Wind			IMP-8							
		x/R_E	y/R_E	z/R_E	x/R_E	y/R_E	z/R_E					
19.05.1996 (день 140)	7.50	102	-34	4	-21	10	-16	327	27	28	307	309
	7.96							327	28	28	310	309
15.07.1996 (день 197)	13.50	195	13	-4	25	-18	5	380	47	57	300	315
	14.70							48	57			
	16.75							51	57			
04.09.1996 (день 248)	3.30	100	0	24	24	-27	-6	320	28	31	134	128
	4.50							320	27	31	132	128
	5.47							320	24	31	127	128
	8.64							340	26	30	122	130
	8.80							340	26	30	125	130
	8.92							340	26	30	125	130
	9.16							340	25	30	125	318
03.11.1996 (день 308)	19.4	114	-32	5	6	-27	-16	325	46	36	317	308
04.11.1996 (день 309)	1.44	110	-26	6	20	-15	-18	360	31	25	300	312
	2.41							375	33	24	290	313
04.04.1997 (день 94)	0.50	220	5		13	-23	18	410	60	62	286	314
03.09.1997 (день 246)	15.60	80	33	0	23	-25	-15	390	21.6	27.8	131	135
23.02.1997 (день 54)	9.74	210	15		-10	-30	-15	480	61	60	315	318
02.03.1998 (день 61)	6.60							400	66	55	315	-
	8.15							420	64	51	316	315
10.03.1998 (день 69)	5.30	233	-21	-23	24	15	14	320	71	60	-	-
	8.50							370	54	51	120	127
	12.00							430	51	51	305	317
21.03.1998 (день 80)	11.4	232	-24	-15	20	0	-15	400	54	50	310	315
	12.55							420	36	47	316	316
16.04.1998 (день 106)	20.25	223	-13	13	32	0	15	350	55	55	125	131
	21.20							350	54	55	128	131
18.06.1998 (день 169)	4.0	77	62	14	35	0	-15	340	29	30	325	317
	9.4							340	33	30	300	317
	22.7							340	27	30	310	317
10.07.1998 (день 191)	22.85	80	15	3	0	-28	16	325	33	37	135	129
01.06.1999 (день 152)	13.60	178	-21	-12	23	-23	2	350	50	47	311	315
	15.10							350	49	47	311	315
08.06.1999 (день 159)	1.65	195	-21	-10	-11	31	-11	345	51	50	310	310
	5.60							360	51	50	310	312
	8.05							360	51	50	132	132
	10.20							365	51	50	132	132
15.06.1999 (день 166)	12.50	205	-21	-8	33	-13	16	290	58	62	310	306
	15.90							330	53	58		
	20.20							330	54	58	120	128
	22.30							330	52	58		
26.09.1999 (день 269)	15.00	61	13	3	33	4	-5	400	8	10	300	315
	20.25							460	10	9	310	317

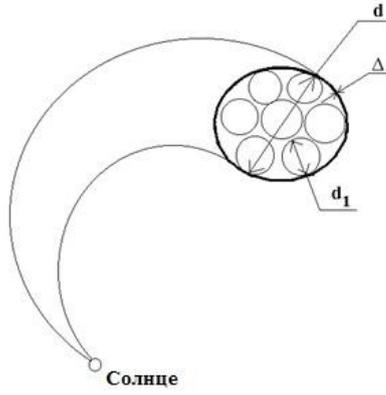


Рис. 11. Схема фрактальной структуры диамагнитной трубки в СВ по результатам исследований данной работы

дем $v_{tr} \approx 25$ км/с — тепловую скорость протонов и $\omega_{pr} \approx 1.1$ с⁻¹ — ларморовскую частоту протонов. Отсюда $\rho_i \approx 23$ км. Таким образом, $\Delta \approx 40\rho_i$. Однако это значение следует считать верхней границей значения Δ , поскольку наблюдаемая минимальная временная ширина скачка δt ограничена временным разрешением метода измерений ~ 3 с, а значит истинное значение δt должно быть меньше.

Сделаем анализ устойчивости дрейфового тока на границе трубки. Известно, что развитие бунемановской неустойчивости становится возможным, если выполняется условие [Михайловский, 1970]:

$$v_d > v_{tr} \quad (5)$$

Величину v_d оценим из соотношения:

$$v_d \approx \frac{\delta B c}{4\pi e \Delta} \approx 0.54 \text{ км/с}, \quad (6)$$

где $c = 3 \cdot 10^5$ км/с, $e = 4.8 \cdot 10^{-10}$ ед. CGSE, $\delta B \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Г. Отсюда $v_d \approx 0.54$ км/с $\ll v_{tr} \approx 25$ км/с.

Таким образом, наблюдаемые дрейфовые токи на границах трубок устойчивы по отношению к раскачке различного типа электростатических и электромагнитных колебаний. Этим, возможно, и объясняется существование в СВ перемещающихся в пространстве квазистационарных диамагнитных трубок с плазмой повышенной плотности.

Схематично фрактальная структура диамагнитных трубок СВ показана на рис. 11. Аналогичная структура для СВ была теоретически получена в работе [Miovanov, Zelenyi, 1994, 1999].

При дальнейшем изложении вместо выражения диамагнитные трубки будем использовать более общий термин — диамагнитные структуры (ДС). Он был введен и использован при анализе взаимодействия участков ГПС с магнитосферой Земли в статье [Parkhomov et al., 2018].

СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ ДИАМАГНИТНОГО ПЛАЗМОИДА СВ И ДИАМАГНИТНЫХ СТРУКТУР ГПС

Перейдем к рассмотрению главной задачи приведенного выше обзора работ по структуре медленного СВ, решение которой до сих пор оставалось неяс-

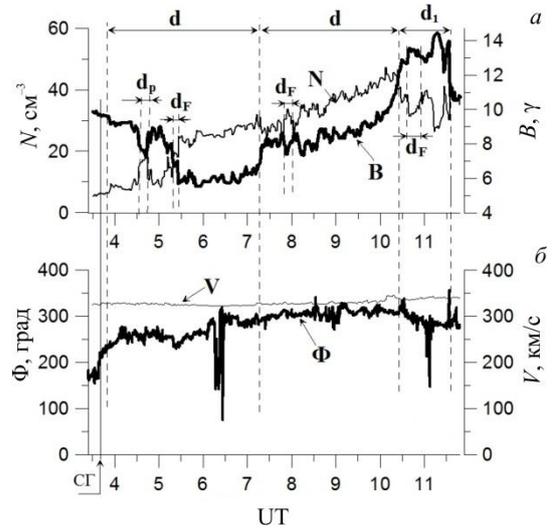


Рис. 12. Параметры СВ в зависимости от времени 5 апреля 2006 г.: а — концентрация плазмы $N(t)$ (жирная кривая), модуль B (тонкая кривая) с временным разрешением ≈ 1 мин; б — азимутальный угол Φ (жирная кривая) и скорость солнечного ветра V (тонкая кривая) с временным разрешением ≈ 1 мин. Данные KA Wind. Положение секторной границы слева показано вертикальной линией со стрелкой вниз и отметкой СГ

ным. Она касается понимания морфологии и природы происхождения в медленном СВ ранее обнаруженных особенностей: локальных повышений плотности (number density structures) на временных масштабах $\Delta t \approx 2 \div 80$ мин [Stansby, Horbury, 2018] и диамагнитных плазмоидов СВ (diamagnetic plasmoid SW) на $\Delta t \approx 5 \div 10$ мин [Karlsson et al., 2015]. Как уже отмечалось во введении, number density structures, регистрировались на расстояниях ≤ 0.5 а.е. [Stansby, Horbury, 2018]. Они, также как диамагнитные плазмоиды СВ были диамагнитны, имели близкий к ним временной размер и регистрировались в медленном СВ. Поэтому в дальнейшем при анализе оба типа структур будем называть диамагнитными плазмоидами СВ.

Рассмотрим типичный участок ГПС на орбите Земли 5 апреля 2006 г. (день 96) в 04:35–04:55 UT.

Как видно из рис. 12, а, профили $B(t)$ и $N(t)$ изменяются в противофазе ($K \approx -0.8$). Весь участок ГПС складывается из трех диамагнитных структур повышенной концентрации $N_{max} > (10 \pm 2)$ см⁻³, две из которых имеют угловой размер $d \approx 2^\circ$, а одна $d_1 \approx 0.7^\circ$. Секторная граница располагается в начале первого участка d в момент времени 3.7 ч 5 июня (б). Скорость V практически не меняется на всем рассматриваемом интервале. Внутри этих трех диамагнитных структур наблюдаются усиления плотности (внутренние ДС) различных меньших масштабов, отражающие фрактальность ДС медленного СВ. Несколько из этих ДС показаны горизонтальными стрелками и обозначены d_F на рис. 12, а. Диамагнитный плазмоид СВ, исследованный в статье [Karlsson et al., 2015] и отмеченный как d_F , очевидно, является одним из этих внутренних элементов фрактальности диамагнитной структуры с угловым размером $d \approx 2^\circ$ рассматриваемого участка ГПС.

Аналогичный сравнительный анализ, проведенный еще для двух диаманитных плазмодов СВ из статьи [Karlsson et al., 2015] для дат 04.04.2004 г. и 11.03.2003 г., приводит также к подобному выводу.

Таким образом, можно достаточно уверенно утверждать, что в отсутствие спорадических потоков диаманитные плазмоды СВ, исследованные в статье [Karlsson et al., 2015], являются внутренними элементами фрактальных диаманитных структур медленного СВ.

ВЫВОДЫ

1. Источником медленного квазистационарного СВ на Солнце являются пояс и цепочки стримеров. Пояс стримеров охватывает все Солнце в виде волнообразной поверхности (юбки) и представляет собой последовательность пар лучей повышенной яркости (концентрации плазмы) или два близко расположенных ряда лучей. Нейтральная линия радиальной компоненты глобального магнитного поля Солнца проходит между лучами каждой из пар вдоль пояса. Продолжением пояса стримеров в гелиосферу является гелиосферный плазменный слой (ГПС).

2. Лучи повышенной яркости пояса стримеров на орбите Земли, т. е. в ГПС, являются диаманитными трубками с плазмой повышенной концентрации плазмы ($N_{\max} > (10 \pm 2) \text{ см}^{-3}$) и пониженным значением межпланетного магнитного поля. Они также обладают тонкой структурой на нескольких пространственных масштабах (фрактальностью), начиная примерно с $1.5^\circ - 3.0^\circ$ и кончая минимальным масштабом $\approx 0.03^\circ - 0.06^\circ$, т. е. угловой размер вложенных друг в друга трубок меняется почти на два порядка.

3. Магнитные трубки на каждом наблюдаемом пространственном масштабе диаманитны, т. е. на их поверхности течет диаманитный ток, уменьшающий магнитное поле внутри трубки и увеличивающий его вне ее. При этом величина $\beta = 8\pi[N(T_e + T_p)]/B^2$ внутри трубки превышает значение β вне ее.

4. Во многих случаях полное давление $P = N(T_e + T_p) + B^2/8\pi$ практически постоянно в трубках и вне их на любом из указанных выше масштабов.

5. Магнитные трубки являются квазистатическими структурами и практически не меняются при движении ГПС между двумя разнесенными в пространстве КА. Сохранение трубками ГПС углового размера при движении от Солнца до орбиты Земли свидетельствует об их квазистационарности на всем этом пути.

6. Дрейфовый (или диаманитный) ток на границе трубок устойчив по отношению к раскачке хаотических колебаний в замагниченной плазме. Все это позволяет ввести более общее название этих трубок — диаманитные структуры (ДС), составляющие основу медленного СВ или ГПС на орбите Земли.

Эти шесть выводов отражают основы современного понимания природы и структуры медленного СВ на всем протяжении от Солнца до орбиты Земли. Проведенный в конце данной статьи сравнительный анализ, основанный на этих выводах, позволил выяснить морфологию и природу происхождения нового термина «диаманитные плазмоды» СВ (или локальные повышения плотности), который появился

в ряде статей за последнее десятилетие. Полученный при этом новый результат сформулирован в выводе 7.

7. Обнаруженные и исследованные ранее в статье [Karlsson et al., 2015; Stansby, Horbury, 2018] диаманитные плазмоды СВ являются мелко-масштабной (по времени и пространству) составляющей фрактальных диаманитных структур медленного СВ.

Автор выражает благодарность Ю.И. Ермолаеву, по инициативе которого была подготовлена данная статья. Автор благодарит также команды LASCO/SOHO, Wind, IMP8, данные которых использовались в работе.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 007-00163-18-00 от 12.01.2018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Некоторые особенности пояса корональных стримеров в солнечной короне и на орбите Земли // *Астрономический журнал*. 2006а. Т. 83, № 9. С. 837–852.

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 аэронавигация*. 2006б. Т. 46, № 6. С. 811–824.

Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1970. Т. 1. 294 с.

Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Еселевич В.Г. и др. Особенности воздействия диаманитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли // *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 47–62. DOI: [10.12737/szf-34201705](https://doi.org/10.12737/szf-34201705).

Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968. 288 с.

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.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G. The heliospheric current sheet (HCS) and high-speed solar wind: interaction effects // *Planetary Space Sci.* 1991. V. 39. P. 737–744.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G. On the existence of the heliospheric current sheet without a neutral line // *Planetary Space Sci.* 1992. V. 40. P. 105.

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.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona // *Solar Phys.* 1999. V. 188. P. 277.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Eselevich M.V. The existence of long-lived rays of the coronal streamer belt. Radial density and velocity distributions of the solar wind flowing in them // *Solar Phys.* 2001. V. 200. P. 259.

Eselevich M., Eselevich V., Fujiki K. Streamer belt and chains as the main sources of quasi-stationary slow solar wind // *Solar Phys.* 2007. V. 240. P. 135–151. DOI: [10.1007/s11207-006-0197-z](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0197-z).

Howard R.A., Koomen M.J., Michels D.J., et al. Report UAG-48. Synoptic Observation of the Solar Corona During Carrington Rotations 1580–1596 (11 October 1971 – 15 January 1973), World Data Center A for STP, NOAA, Boulder, Colorado, 1975.

Illing R.M., Hundhausen A.J. Disruption of a coronal streamer by an eruptive prominence and a coronal mass ejection // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 10951.

Ivanov K., Bothmer V., Cargill P.J., et al. Subsector structure of the interplanetary space // *Proc. The Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference*. Vicvo Equense (Italy). 2002. P. 317.

Karlsson T., Brenning N., Nilsson H., Trotignon J.-G., Vallières X., Facsko G.. Localized density enhancements in the magnetosheath: Three-dimensional morphology and possible importance for impulsive penetration. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, iss. A3, pp., CiteID A03227. DOI: [10.1029/2011JA017059](https://doi.org/10.1029/2011JA017059).

Karlsson T., Kullen, A., Liljeblad E., Brenning N., Nilsson H., Gunell H., Hamrin M. On the origin of magnetosheath plasmoids and their relation to magnetosheath jets. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, iss. 9, pp. 7390–7403. DOI: [10.1002/2015JA021487](https://doi.org/10.1002/2015JA021487).

Korzhov N.P. Large-scale three-dimensional structure of the interplanetary magnetic field // *Solar Phys.* 1977. V. 55. P. 505.

Milovanov A.V., Zelenyi L.M. Fractal clusters in the solar wind // *Adv. Space Res.* 1994. V. 14. P. 123–133.

Milovanov A.V., Zelenyi L.M. Fraction excitations as a driving mechanism for the self-organized dynamical structuring in the solar wind // *Astrophys. Space Sci.* 1999. V. 264. P. 317–345.

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](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.010).

Schwenn R., March E. *Physics of the Inner Heliosphere. II. Particle, waves and turbulence* // Springer-Verlag, 1991. 185 p.

Stansby D., Horbury T.S. Number density structures in the inner heliosphere // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 613, N A62. P. 7. DOI: [10.1051/0004-6361/201732567](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732567).

Svalgaard L.J., Wilcox W., Duvall T.L. A model combining the solar magnetic field // *Solar Phys.* 1974. V. 37. P. 157.

Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudostreamers // *Astrophys. J.* 2007. V. 685. P. 1340.

Winterhalter D., Smith E.J., Burton M.E., Murphy N. The heliospheric plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 6667.

Woo R., Armstrong J.W., Bird M.K., Patzold M. Fine-scale filamentary structure in coronal streamers // *Astrophys. J.* 1995. V. 449. P. L91–L94.

URL: <http://wso.stan-ford.edu> (дата обращения 25 мая 2019).

REFERENCES

Borrini G., Wilcox J.M., Gosling J.T., Feldman W.C. Wilcox J.M. 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, pp. 4565.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G. The heliospheric current sheet (HCS) and high-speed solar wind: interaction effects. *Planetary Space Sci.* 1991, vol. 39, pp. 737–744.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G. On the existence of the heliospheric current sheet without a neutral line. *Planetary Space Sci.* 1992, vol. 40, pp. 105.

Eselevich M.V., Eselevich V.G. Some features of coronal streamer belt in the solar corona and in Earth's orbit. *Astronomicheskii Zhurnal* [Astron. J.]. 2006a, vol. 83, no. 9, pp. 837–852. (In Russian).

Eselevich M.V., Eselevich V.G. Manifestation of radial structure of the coronal streamer belt as sharp peaks in the solar wind plasma density in Earth's orbit. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006b, vol. 46, iss.6, pp. 710–782. DOI: [10.1134/S0016793206060132](https://doi.org/10.1134/S0016793206060132).

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

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona. *Solar Phys.* 1999, vol. 188, pp. 277.

Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Eselevich M.V. The existence of long-lived rays of the coronal streamer belt. Radial density and velocity distributions of the solar wind flowing in them. *Solar Phys.* 2001, vol. 200, p. 259.

Eselevich M., Eselevich V., Fujiki K. Streamer belt and chains as the main sources of quasi-stationary slow solar wind. *Solar Phys.* 2007, vol. 240, pp. 135–151. DOI: [10.1007/s11207-006-0197-z](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0197-z).

Frank-Kamenetsky D.A. *Lectures on Plasma Physics.* Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 288 p. (In Russian).

Howard R.A., Koomen M.J., Michels D.J., Tousey R., Detwiler C.R., Roberts D.E., et al. Report UAG-48. Synoptic observation of the solar corona during Carrington rotations 1580–1596 (11 October 1971 – 15 January 1973), World Data Center A for STP, NOAA, Boulder, Colorado, 1975.

Illing R.M., Hundhausen A.J. Disruption of a coronal streamer by an eruptive prominence and a coronal mass ejection. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, pp. 10951.

Ivanov K., Bothmer V., Cargill P.J., P., Kharshiladze A.F., Romashets E.P., Veselovsky I.S. Subsector structure of the interplanetary space. *Proc. The Second Solar Cycle and Space Whether Euroconference.* Vicvo Equense (Italy). 2002, pp. 317–320.

Karlsson T., Brenning N., Nilsson H., Trotignon J.-G., Vallières X., Facsko G.. Localized density enhancements in the magnetosheath: Three-dimensional morphology and possible importance for impulsive penetration. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, iss. A3, CiteID A03227. DOI: [10.1029/2011JA017059](https://doi.org/10.1029/2011JA017059).

Karlsson T., Kullen, A., Liljeblad E., Brenning N., Nilsson H., Gunell H., Hamrin M. On the origin of magnetosheath plasmoids and their relation to magnetosheath jets. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, iss. 9, pp. 7390–7403. DOI: [10.1002/2015JA021487](https://doi.org/10.1002/2015JA021487).

Korzhov N.P. Large-scale three-dimensional structure of the interplanetary magnetic field. *Solar Phys.* 1977, vol. 55, p. 505.

Mikhailovsky A.B. *Teoriya plazmennykh neustoiichivostei* [Theory of Plasma Instabilities]. Moscow, Atomizdat, 1970. vol. 1. 294 p. (In Russian).

Milovanov A.V., Zelenyi L.M. Fractal clusters in the solar wind. *Adv. Space Res.* 1994, vol. 14, pp. 123–133.

Milovanov A.V., Zelenyi L.M. Fraction excitations as a driving mechanism for the self-organized dynamical structuring in the solar wind. *Astrophys. Space Sci.* 1999, vol. 264, pp. 317–345.

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Dmitriev A.V., Chilikin V.E. Features of the impact of the solar wind diamagnetic structure on Earth's magnetosphere. *Solar-Terrestrial Phys.* 2017, vol. 3, no. 4, pp. 44–57. DOI: [10.12737/stp-34201705](https://doi.org/10.12737/stp-34201705).

Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Dmitriev A.V., Chilikin V.E. Solar wind diamagnetic structures as a source of substorm-like disturbances. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 181, pp. 55–67. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.010).

Schwenn R., March E. *Physics of the inner heliosphere. II. Particle, waves and turbulence.* Springer-Verlag, 1991, 185 p.

Stansby D., Horbury T.S. Number density structures in the inner heliosphere. *Astron. Astrophys.* 2018, vol. 613, no. A62, p. 7. DOI: [10.1051/0004-6361/201732567](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732567).

Svalgaard L.J., Wilcox W., Duvall T.L. A model combining the solar magnetic field. *Solar Phys.* 1974, vol. 37, p. 157.

Wang Y.M., Sheeley N.R., Rich N.B. Coronal pseudostreamers. *Astrophys. J.* 2007, vol. 685, p. 1340.

Winterhalter D., Smith E.J., Burton M.E., Murphy N., The heliospheric plasma sheet. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, p. 6667.

Woo R., Armstrong J.W., Bird M.K., Patzold M. Fine-scale filamentary structure in coronal streamers. *Astrophys. J.* 1995, vol. 449, pp. L91–L94.

URL: <http://wso.stan-ford.edu> (accessed 25 May 2019).

Как цитировать эту статью:

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).