

УДК 523.62-726

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И СТРУКТУРА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

© 2022 г. Р. А. Кислов^{1, 2, *}, В. Д. Кузнецов^{2, **}

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: kr-rk@bk.ru

**e-mail: kvd@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 19.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Проанализированы природа высокоскоростных потоков из корональных дыр и механизм их коротации с источником. Показано, что распространенное представление о высокоскоростных потоках из корональных дыр как о потоках частиц, которые коротатируют с Солнцем, противоречит наблюдениям. Предложена модель, в которой спиральная структура и коротация высокоскоростных потоков из корональных дыр объясняются в рамках кинематики.

DOI: 10.31857/S0016794022060074

1. ВВЕДЕНИЕ

О существовании областей сжатия и разрежения на границах быстрых и медленных потоков в солнечном ветре стало известно уже после первых межпланетных миссий в 1960-ых годах (в первую очередь IMP-1, Mariner 2). Качественно свойства областей были описаны в работах [Parker, 1965; Dessler, 1967; Carovillano and Siscoe, 1969]. В данных моделях использовалось предположение, что в солнечном ветре есть неоднородности, которые испытывают вариации с частотой вращения Солнца. Причины возникновения таких вариаций еще не были известны, но их существование к концу 1960-ых годов было подтверждено наблюдениями. Вскоре после открытия корональных дыр [Krieger et al., 1973 and references therein] была установлена связь между коротатирующими потоками и корональными дырами. По данным многоспутниковых наблюдений (IMP-8, Pioneer-10, 11) удалось обнаружить, что вариации энергичных протонов происходят с частотой вращения Солнца. Сдвиг по времени детектирования на различных аппаратах соответствует моментам их пересечения с некоторой коротатирующей с Солнцем спиралью. Причем основание спирали на Солнце расположено внутри корональной дыры [Barnes and Simpson, 1976].

Границы между быстрыми и медленными потоками называли stream interaction regions (SIRs), причем те из них, которые живут дольше одного оборота вокруг Солнца, называют corotating inter-

action regions (CIRs). Исторически, сначала было введено второе понятие, а потом классификация была усложнена. По современным представлениям, высокоскоростные потоки из корональных дыр (ВПКД) представляют собой огромные магнитные и плазменные трубы, исходящие из корональных дыр и опускающиеся на низкие широты вдали от Солнца [Khabarova et al., 2021a]. SIRs/CIRs выступают в роли их границ.

После того, как ВПКД были обнаружены, исследователи стали задаваться вопросами о природе их спиральной формы и коротации с источником. В течение более чем 20 лет сосуществовали две точки зрения. Первая – ВПКД представляют собой волновые возмущения, вызванные нестационарными эффектами вблизи Солнца. Вторая – ВПКД – это коротатирующие струи плазмы. В последнем случае речь идет о коротации составляющих плазму частиц и, как следствие, возникновении коротации ВПКД как совокупности частиц. Первая точка зрения является развитием моделей коротатирующих потоков 1960-ых и начала 70-ых годов [Parker, 1965; Dessler, 1967; Carovillano and Siscoe, 1969, Hundhausen, 1973]. Ее также поддержало открытие Бурлаги [Burlaga, 1983]. Было показано на основе анализа данных Voyager-1, 2, что есть связь между коротатирующими потоками и волнами полного давления: $2nT + B^2/8\pi$, где n – концентрация плазмы, T – температура, B – модуль магнитного поля. Далее Бурлага совместно с Клейном построили модель, иллюстри-

рующую распространение спиральных волн давления в гелиосфере [Burlaga and Klein, 1986]. Модель не отвечала на вопрос о том, как эти волны возникают, но описывала наблюдения, в частности, распространение прямой и обратной ударных волн на границах ВПКД. Авторы предполагали, что волны возникают из-за взаимодействия быстрого и медленного потоков вблизи Солнца и, в этом смысле, являются *динамическими структурами*. Далее волны распространялись без изменений, а из-за сложения волн, выпущенных вращающимся источником, формировалась спираль. Механизм образования волн оставался не ясным. В то же время, наличие волн было необязательным для формирования спиральной коротящей структуры. В цикле работ Пиззо с соавторами [Pizzo, 1978, 1980, 1982, 1991; Pizzo and Gosling 1994] были построены численные МГД-модели, в большей части из которых ударные волны учитывались. Как следствие неоднородных по направлению граничных условий, были получены решения, в которых возмущения в гелиосфере коротировали с Солнцем и могли образовывать спирали. Однако, изучение природы ВПКД и механизма их коротации не было основной целью моделирования. Поэтому причинам, по которым численные решения обладали указанными свойствами, почти не уделялось внимание. В обзоре [Gosling and Pizzo, 1999] было упомянуто, что ВПКД можно интерпретировать как динамические структуры, образованные частицами, выпущенными в разные моменты времени и разных областей Солнца. Вероятно, часть авторов придерживалась данной точки зрения и раньше, но она не была ранее сформулирована четко. Вскоре основное внимание было привлечено к другой интерпретации ВПКД. По результатам работ [Geiss, 1995; Wimmer-Schweingruber, 1997] было показано, что в SIRs/CIRs соотношения концентраций многозарядных ионов (O^{7+}/O^{6+} , Mg/O и других) меняются также, как при переходе от быстрого к медленному солнечному ветру. Поскольку данные соотношения определяются условиями в короне, был сделан вывод, что ВПКД — это коротящие струи плазмы из корональных дыр. Иными словами, был сделан выбор в пользу второй интерпретации. При этом ВПКД как динамическая структура, т.е. образованная взаимодействием волн, продолжала рассматриваться при изучении эволюции фронтов ударных волн [Richardson, 2018].

Таким образом, в настоящее время ВПКД интерпретируется как поток вещества, который физически, подобно стрелке часов, вращается вокруг Солнца, коротя с корональной дырой-источником, и закручиваясь в спираль. Формально, в МГД-моделях коротация и спиральная форма потока получаются как следствие граничных условий. Но в большинстве современных работ не уделяется внимание тому, что именно коротит

рует с источником — вещество или структура. Однако, для понимания природы ВПКД этот вопрос важен. Как мы ниже покажем, плазма и границы между быстрыми и медленными потоками вращаются вокруг Солнца с отличающимися по порядку величины скоростями. Поэтому распространенная интерпретация ВПКД не вполне корректна. В данной работе мы показываем, что коротация ВПКД и корональной дыры, а также спиральная форма ВПКД могут быть объяснены в рамках кинематики. Иными словами, предложена новая интерпретация ВПКД.

2. НАБЛЮДЕНИЯ. ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КОРТИРУЮЩИЙ ПОТОК ИЗ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ НЕ МОЖЕТ БЫТЬ ПРЕДСТАВЛЕН КАК СТРУЯ ПЛАЗМЫ, КОРТИРУЮЩАЯ С ИСТОЧНИКОМ НА СОЛНЦЕ

Точка зрения, согласно которой ВПКД представляет собой единый поток из частиц, коротящих с источником на Солнце, противоречит наблюдениям. Для того чтобы это показать, сравним скорости вращения вокруг Солнца плазмы внутри ВПКД и самого ВПКД.

Как говорилось во введении, существует ряд работ, в которых сделаны оценки угловой скорости ВПКД [Krieger et al., 1973; Burlaga, 1983; Lee, 2000; Crooker et al., 2004; Vochsler et al., 2010]. Все они показывают, что ВПКД как целое коротит с Солнцем, т.е. его угловая скорость близка к 2.865×10^{-6} рад/с [Carrington, 1863]. В частности, угловая скорость ВПКД может быть оценена по движению stream interface (SI). SI выступает в роли границы ВПКД и разделяет области быстрого и медленного солнечного ветра. В работе [Khabarova et al., 2021b] были выделены последовательные пересечения одного и того же SI аппаратами ACE и STEREO A. Средняя угловая скорость ВПКД была оценена по разности времен прихода SI на аппараты и составила 3.243×10^{-6} рад/с. Иными словами, ВПКД может вращаться несколько быстрее, чем Солнце на широте источника. В этом нет ничего удивительного. Наблюдения движения корональных дыр на Солнце показывают, что они могут иметь угловую скорость выше на 10–20%, чем у окружающей плазмы [Insley et al., 1995].

Оценка $\omega = 3.243 \times 10^{-6}$ рад/с — угловая скорость структурного элемента ВПКД. Ей соответствует линейная скорость движения ВПКД в азимутальном направлении $v_\phi = \omega(1 \text{ AU}) \approx 500$ км/с. Стоит отметить, что произведение угловой скорости Солнца и 1 AU превышает 400 км/с.

Если допустить, что 400 или 500 км/с — это скорость движения вещества в азимутальном направлении, то это фантастически большая величина. Типичные значения азимутальной компо-

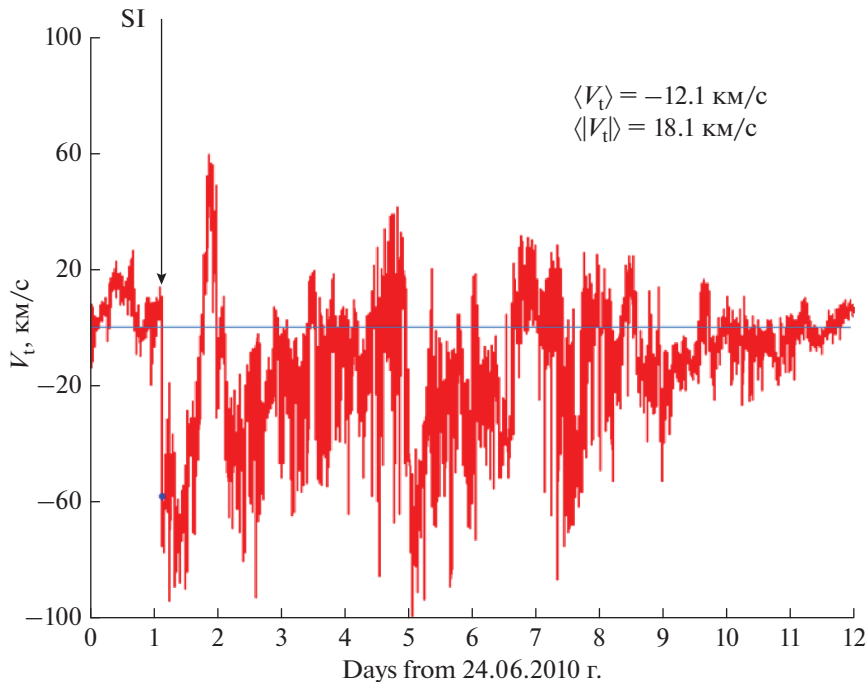


Рис. 1. Тангенциальная компонента скорости V_t солнечного ветра с 24.06.2010 0.00 по 05.07.2010 0.00. Минутные данные ACE, система координат RTN. Стрелка показывает момент пересечения Stream Interface (SI) на переднем крае потока. Указаны средние значения V_t и средний модуль: $\langle V_t \rangle$ и $\langle |V_t| \rangle$.

ненты скорости солнечного ветра на 1 AU — это единицы или десятки км/с [Hundhausen, 1968; Pizzo et al., 1983]. На рисунке 1 показаны значения тангенциальной составляющей скорости солнечного ветра в системе координат RTN по минутным данным аппарата ACE. Рассмотрен период времени до и после пересечения SI из работы [Khabarova et al., 2021b]. Азимутальная v_ϕ и тангенциальная V_t компоненты скорости в RTN совпадают. Данные ACE за различные периоды времени находятся в свободном доступе по ссылке <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>. Как можно видеть из рис. 1, величина тангенциальной компоненты скорости V_t варьируется от -60 до 60 км/с. Среднее значение V_t равно -12.1 км/с (против направления вращения Солнца), средний модуль V_t равен 18.1 км/с. Таким образом $V_t \ll 500$ км/с всюду, как снаружи, так и внутри ВПКД. Иными словами, движение плазмы и ВПКД как целого в одних и тех же точках пространства существенно различается. Поэтому ВПКД на 1 AU не может быть представлен как единый коротящий поток, состоящий из одних и тех же частиц.

Вне 1 AU последний вывод остается верным для больших r , пока сохраняется коротация ВПКД. Также он верен для тех расстояний в пределах 1 AU, на которых величина ωr превышает азимутальную компоненту скорости плазмы. Считается, что в солнечном ветре коротация плазмы с Солнцем нарушается за пределами

альфвеновской поверхности, которая в большинстве моделей расположена на $10-20$ радиусах Солнца ($0.05-0.1$ AU, [Fahr and Fichtner, 1991]). Вероятно, на малых расстояниях ВПКД может двигаться как твердое тело.

Как было сказано во введении, ВПКД не может быть представлен только как волна давления. Поскольку движение ВПКД не совпадает с движением входящей в него плазмы, он не является материальным объектом. Возникает противоречие. Не понятно, каким образом ВПКД коротярует с Солнцем и какова его природа. Ниже мы предлагаем решение данной проблемы.

3. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КОРОТАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР (ВПКД) С СОЛНЦЕМ

3.1. Кинематическая модель ВПКД

Всякий, кто видел вращающийся садовый разбрызгиватель, знает, что струи воды при разлете образуют спирали. Причина их формирования — наличие у капель азимутальной компоненты скорости. Если пренебречь сопротивлением воздуха, она не будет зависеть от расстояния до разбрызгивателя. Тогда угловая скорость капель окажется обратно пропорциональной расстоянию. При этом наблюдатель (например, цветок) будет попадать под брызги с частотой вращения разбрызгивателя, не зависящей от расстояния и умно-

женной на число струй. Иными словами, частоты прихода возмущений и частоты вращения вещества могут отличаться по причине вращения источника без присутствия каких-либо динамических эффектов. В отличие от примера с лейкой, потоки солнечного ветра распространяются во всех направлениях, хоть и с разной скоростью, и могут участвовать в сложных взаимодействиях друг с другом. Тем не менее, остается принципиальный вопрос – являются ли динамические эффекты причиной формирования спирального возмущения и его коротации? Для того чтобы на него ответить, можно исследовать упрощенную модель распространения потоков вещества из корональной дыры, не учитывающую какие-либо динамические эффекты.

Рассмотрим двумерную задачу в цилиндрических координатах (r, φ) в плоскости, перпендикулярной оси вращения Солнца. Пусть имеется корональная дыра с угловой шириной $\Delta\varphi$, и она является источником плазмы с радиально направленной скоростью v относительно Солнца, вращающегося с частотой ω . Пусть в инерциальной системе отсчета каждый элемент жидкости движется с постоянной скоростью равномерно и прямолинейно, не испытывая каких-либо внешних воздействий.

При сделанных предположениях межпланетное пространство представляет собой линейную среду. Если на вход с источника на Солнце подается некоторая функция f_{in} , например концентрация, то в каждой точке, где есть наблюдатель, в каждый момент времени будет измерена функция f_{out} . Значения f_{in} и f_{out} связаны между собой посредством свертки:

$$f_{out}(r, \varphi, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{in}(r', \varphi', t') g(r - r', \varphi - \varphi', t - t') dr' d\varphi' dt', \quad (1)$$

где g – функция распространения, представляющая собой результат измерения поданного на вход δ -импульса (в теории сигналов также называется аппаратной функцией). Выражение (1) фактически описывает сложение серии поданных на вход сигналов f_{in} с разными весовыми коэффициентами g . Найдем функцию распространения в рамках модели. В качестве δ -сигнала рассмотрим дугообразный выброс вещества со скоростью v , произошедший в момент времени $t_0 = 0$ на расстоянии $r = r_0$ от центра Солнца. Такой сигнал имеет вид

$$f_{0-in} = \frac{1}{2} A_0 \delta(r - r_0) \delta(t - t_0) (\theta(\varphi) + \theta(\Delta\varphi - \varphi)), \quad (2)$$

где θ – ступенчатая функция Хевисайда. Комбинация ступенчатых функций задает коротацию элементов плазмы в начальный момент времени

и конечный размер источника. Поскольку (2) – аналог δ -сигнала, интеграл от него должен быть равен 1, поэтому $A_0 = 1/\Delta\varphi$. При свободном прямолинейном движении со скоростью $(v, \omega r_0)$ дугообразный выброс преобразуется в

$$f_{0-out} = \frac{1}{2} A \delta\left(r - r_0 - v\left(\varphi - \frac{\omega r_0}{r} t\right) t\right) \times \left(\theta\left(\varphi - \frac{\omega r_0}{r} t\right) + \theta\left(\Delta\varphi - \varphi + \frac{\omega r_0}{r} t\right)\right), \quad (3)$$

где $\omega r_0/r$ – угловая скорость на расстоянии r , A – амплитуда, $v\left(\varphi - \frac{\omega r_0}{r} t\right)$ – скорость плазмы внутри корональной дыры в том направлении, откуда был испущен пришедший в точку наблюдения элемент плазмы. Отметим, что A может зависеть от r , однако учет этого факта тривиален и не влияет на дальнейшие рассуждения. Вместе с тем выбор $A(r)$ требует дополнительных предположений. Например, если f – это концентрация, то может потребоваться рассмотреть закон сохранения вещества. Мы этот момент не конкретизируем и сосредотачиваемся на остальных сомножителях.

С помощью (1–3) можно найти аппаратную функцию.

$$g(r^1, \varphi^1, t^1) = \frac{A}{A_0} \delta(r^1 - v(\varphi - \varphi^1)t^1) \delta\left(\varphi^1 - \frac{\omega r_0}{r^1 + r_0} t^1\right). \quad (4)$$

Во избежание недоразумений отметим, что в формуле (4) все скобки подразумевают зависимость от аргумента, а не умножение. Под углом φ следует понимать направление на наблюдателя. Если в (3) имеется $A(r)$, то в (4) будет входить $A(r^1 + r_0)$. Теперь рассмотрим источник внутри корональной дыры более общего вида

$$f_{in} = \frac{1}{2} A_0 F_0(\varphi - \omega t) \delta(r - r_0) \times (\theta(\varphi - \omega t) + \theta(\Delta\varphi - (\varphi - \omega t))), \quad (5)$$

где F_0 описывает неоднородное распределение по углу исследуемой величины в корональной дыре. Функции Хевисайда и F_0 зависят от $\varphi - \omega t$. Тем самым учитывается вращение корональной дыры. Источник предполагается непрерывным во времени, но по-прежнему локализован на расстоянии r_0 от центра Солнца. Пусть для простоты $v = \text{const}$. Тогда на выходе получим наблюдаемую величину

$$f_{out} = \frac{1}{2} A F_0(\varphi_1) (\theta(\varphi_1) + \theta(\Delta\varphi - \varphi_1)), \quad (6)$$

где φ_1 – фаза возмущения, равная

$$\varphi_1 = \varphi - \omega t - \frac{\omega r_0}{r} \frac{r - r_0}{v} + \omega \frac{r - r_0}{v}. \quad (7)$$

В случае если v зависит от φ , следует вместо $(r - r_0)/v$ подставить в формулу (7) решение уравнения

$$r - r_0 = v \left(\varphi - \frac{\omega r_0}{r} t \right) t \quad (8)$$

относительно t .

Рассмотрим, что представляют собой поверхности равной фазы в (7).

1) Пусть φ_1 и r фиксированы. Тогда выражение (7) примет вид $\varphi - \omega t = \text{const}$, что соответствует вращению фазовой поверхности с частотой источника возмущений, равной ω . Иными словами, фазовая поверхность коротирует с источником.

2) Пусть φ_1 и t фиксированы. Тогда из (7) будет следовать уравнение, описывающее форму фазовой поверхности

$$\varphi - \omega \frac{r - r_0}{v} \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) = \text{const}. \quad (9)$$

Формула (9) описывает спираль, при $r \gg r_0$ совпадающую с Архимедовой. Отметим, что в модели нет магнитного поля, поэтому существование данной спирали никак не связано с наличием спирали Паркера. У нас спираль (9) возникает из-за сложения (1) последовательных дугообразных выбросов плазмы из вращающейся корональной дыры (5). Кроме того, спираль магнитного поля и спираль (9) могут не совпадать вблизи Солнца.

3) Пусть φ_1 фиксировано, $t = (r - r_0)/v$. Иными словами, мы наблюдаем за вращением элемента плазмы, пришедшего в данный момент времени в точку наблюдения r . Из (7) получим $\varphi - \frac{\omega r_0}{r} t = \text{const}$, что соответствует вращению с частотой $\omega r_0/r$ и постоянной азимутальной компонентой скорости ωr_0 . Иными словами, частицы, как и заложено в модель, движутся преимущественно радиально (рисунок 2). Действительно, скорость быстрого солнечного ветра составляет 450–900 км/с, а $\omega r_0 = 2$ км/с на уровне фотосферы или $\omega r_0 = 20$ км/с, если $r_0 \approx 10$ солнечных радиусов.

Рисунок 2 позволяет лучше понять разницу между “коротирующими струями плазмы” и “коротацией структуры”. Красные стрелки на рисунке 2 показывают траекторию частиц солнечного ветра в модели. Как видно, они движутся радиально. Синие спирали соответствуют областям, в которых в фиксированный момент времени находятся частицы, вышедшие из одной и той же части корональной дыры. В каждый последующий момент времени синяя спираль поворачивается вокруг оси Солнца с угловой скоростью корональной дыры. Скорость солнечного ветра в модели зависит только от источника – корональная дыра, или невозмущенные области Солнца. Это значит, что в каждый момент времени частицы, вышедшие из корональной дыры, образуют рукав. Этот рукав отличается от окружающего солнечного ветра более высокой радиальной компонентой скорости плазмы и более низкой плот-

ностью. Таким образом, вращение спиралей – это вращение возмущений параметров солнечного ветра. Коротацию этих возмущений с источником на Солнце мы называем “коротацией структуры”. “Коротацией потоков” мы называем воображаемую ситуацию, когда поток из корональной дыры на расстояниях порядка 1 AU вращается вокруг Солнца как твердое тело. Как показано, выше, такая точка зрения противоречит наблюдениям. Тем не менее, она в явной или неявной форме часто встречается в литературе.

3.2. Обсуждение кинематической модели

В уравнениях (5)–(9) мы учитываем только плазму, исходящую из корональной дыры. Однако не составляет труда учесть окружающий солнечный ветер. Поскольку модель линейная, то к неізотропному источнику (5) можно добавить еще один:

$$f_{in-1} = \frac{1}{2} A_0 F_1 (\varphi - \omega t) \delta(r - r_0), \quad (10)$$

которому будет соответствовать

$$f_{out-1} = A F_1 (\varphi_1), \quad (11)$$

где φ_1 определено выше. В случае $F_1 = \text{const}$ мы получим изотропный фон, соответствующий невозмущенному солнечному ветру. В случае, если F_1 – комбинация нескольких источников вида (5) с различными ширинами $\Delta\varphi$ и границами областей, мы получим несколько корональных дыр и потоков из них. В реальности число ВПКД на низких гелиоширотах почти всегда четно (Richardson, 2018).

Выражения (10) и (11) в линейной комбинации с (2) и (6) позволяют учесть не только высокоскоростной поток из корональной дыры, но и изотропный невозмущенный солнечный ветер с ненулевой скоростью. Таким образом, в задаче задается граничное условие не только на концентрацию, но и на скорость солнечного ветра как внутри источника высокоскоростного потока, так вне него. Граничное условие на скорость плазмы обязательно, поскольку оно входит в функцию распространения (5). Наличие неоднородности скорости в модели является необходимым для получения коротирующей спиральной структуры. Данный факт согласуется с наблюдениями, согласно которым, если есть неоднородность скорости плазмы в области источника, то уже на 10 радиусах Солнца начинается формироваться спиральная структура ВПКД [Ефимов и др., 2021].

Покажем пример вычисления с двумя потоками – быстрым из корональной дыры и медленным изотропным в остальных направлениях. На рисунке 3 показана плотность плазмы в произвольных единицах в плоскости, перпендикулярной оси вращения Солнца (направлена на читате-

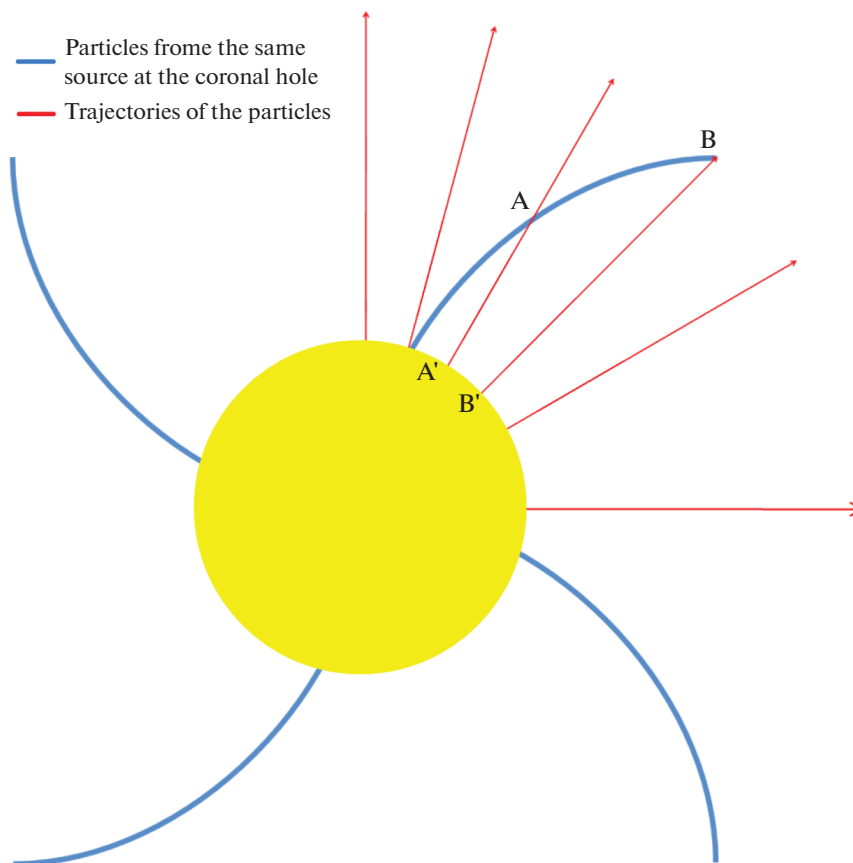


Рис. 2. Схематическое представление траекторий частиц в модели (красные стрелки) и областей пространства, в которых в фиксированный момент времени находятся частицы, испущенные из одной и той же области корональной дыры в разные моменты времени (синие спирали). Например, частица, расположенная в точке А, была выпущена тогда, когда ее источник располагался в точке А'. Аналогично связаны точки В и В'. Инерциальная система отсчета. Ось вращения Солнца направлена на читателя.

ля, Солнце в центре). В качестве F_1 в (10), (11) выбрана функция $\sin(\varphi_1)$, где $\varphi_1 = -\omega t + 2\varphi + \omega r/v + + 0.25\pi$ – модифицированная форма (7). Она соответствует наличию двух одинаковых потоков (коэффициент 2 перед φ в формуле), величине $r_0 = 0$ (большие расстояния от Солнца), $v = 400$ км/с, размер области с визуализацией $4 \text{ AU} \times 4 \text{ AU}$. Выбран момент времени $t = 0$. Решение описывает типичное возмущение плотности, имеющее форму спирали. Зависимость амплитуды плотности от расстояния в формуле (11) не учитывалась в демонстрационных целях. Возмущения плотности данного вида были ранее получены в ряде работ на основе других предположений (Burlaga and Klein 1986), либо в рамках полных МГД-моделей [Pizzo, 1978, 1980, 1982, 1991; Odstrčil, 2003 и обобщения].

Рассмотрим, как в модели возникают коротящиеся спиральные возмущения. Корональная дыра вращается синхронно с Солнцем. В каждый момент времени она выбрасывает плазму в сектор шириной $\Delta\varphi$. Каждый выброс представляет собой веер из элементов жидкости. Если мы зафиксируем в каждой последовательности выбросов

элемент, отвечающий центру “веера”, то это будут элементы, характеризующиеся одинаковым значением величины f (плотности или скорости) и положением относительно корональной дыры в момент испускания. Поэтому линия, соединяющая выбранные элементы, может быть представлена как поверхность равной фазы (7). При этом те выбросы, которые были выпущены из корональной дыры позже, успеют пройти меньший путь и стартуют с большего значения угла φ из-за вращения Солнца (рис. 4). Таким образом поверхность равной фазы должна представлять собой спираль, закрученную против направления вращения источника (рис. 3, 4 и формула (8)). Именно это описывает измеряемая функция (6) с фазой (7), а также функция (11).

Отметим, что при смещении серии выбросов на произвольное время Δt картина не изменится, если корональная дыра имеет неизменные свойства. Серия выбросов, смещенных на время Δt , образует аналогичную спираль. Поэтому можно наблюдать коротацию спирали с источником.

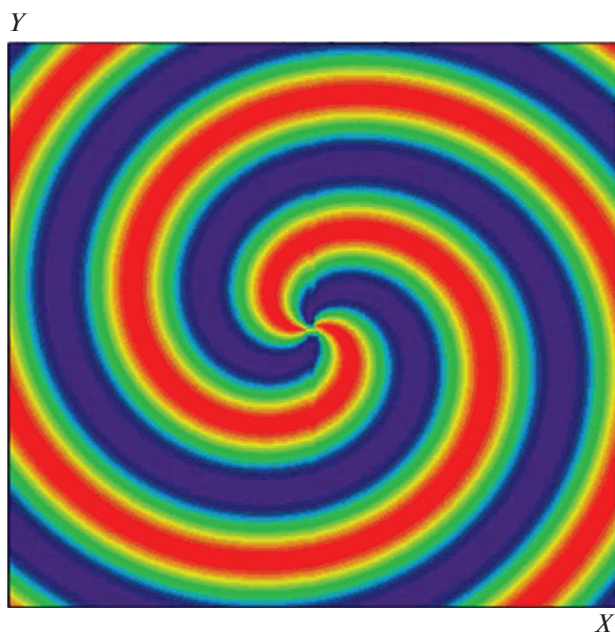


Рис. 3. Плотность плазмы, произвольные единицы измерения. Различными цветами отмечены чередующиеся области сжатия и разрежения. Показана плоскость, перпендикулярная оси вращения Солнца (направлена на читателя, Солнце в центре). Размер области моделирования равен $4 \text{ AU} \times 4 \text{ AU}$.

Аналогично возникает спиральная волна при сложении цилиндрических или сферических волн от движущегося по замкнутой траектории источника. Отличие от примера с разбрызгивателем здесь в непрерывности потока и в характерных значениях соотношений между азимутальными ωr_0 и радиальными v проекциями скорости брызг/потоков плазмы.

Как мы видим, спираль ВПКД представляет собой совокупность независимых струй (рис. 4).

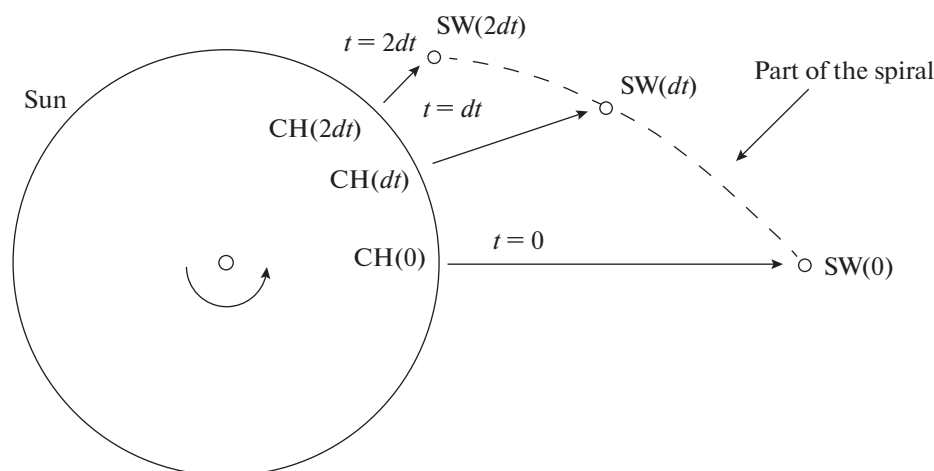


Рис. 4. Схематически показано формирование спирали различными струями вещества, выпущенными в различные моменты времени (0, dt, 2dt). CH – положение корональной дыры. Длина стрелок соответствует пути, пройденному элементом плазмы. Штриховой линией отмечена часть спирали.

Она образована в каждой точке частицами, выпущенными в различные моменты времени и, как правило, из различных точек. Т.е. ВПКД – это не единый поток с фиксированным набором частиц. С другой стороны, все частицы, составляющие фазовую поверхность (спираль) вышли из одной и той же корональной дыры, причем из одной и той же ее области. Таким образом модель объясняет данные, согласно которым соотношения содержаний высокозарядных ионов ($\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$ и другие, [Lepri et al., 2013; Zhao et al., 2016]) такие же, как в корональных дырах.

3.3. Потоки из корональных дыр как спиральные волны плотности

В модели спираль является следствием движения потоков, а их взаимодействие не рассматривается. Поэтому она не является динамической структурой, как это предполагалось в ранних моделях [Parker, 1965; Dessler, 1967; Carovillano and Siscoe, 1969]. Тем не менее, на границах ВПКД могут формироваться ударные волны [Burlaga, 1983; Burlaga and Klein, 1986]. Покажем, что динамические структуры могут формировать спирали, подобные тем, что возникают в кинематической модели.

В астрофизических задачах и при моделировании солнечного ветра спиральная форма возмущений часто считается заранее заданной, а основное внимание уделяется свойствам таких возмущений, их устойчивости и следствиям их существования. В случае, когда в задаче зависимость от времени возникает из-за нарушения осевой симметрии и вращения центрального тела, применяют квазистационарный формализм [Бескин, 2006, 2010], в котором любая функция f имеет форму $f(r', \varphi', z')$, где (r', φ', z') – координаты во вращающейся системе отсчета. Далее предпола-

гаются [Balbus and Hawley 1991], что возмущения в данной системе отсчета являются стационарными и имеют вид спиральных волн

$$f = f_0 \exp(i(k_r r' + m\phi' + k_z z')), \quad (12)$$

где волновое число k_r может зависеть от времени в случае, если угловая скорость возмущения зависит от r . При переходе в инерциальную систему отсчета любое возмущение (12) принимает вид

$$f = f_0 \exp\left(i\left(\left(k_r + m\frac{\partial\omega}{\partial r}\right)r + m(\phi - \omega t) - k_z z\right)\right). \quad (13)$$

Если в формуле (13) предположить, что $\omega = \text{const}$, $k_r = \omega/v$, $m = 1$, $k_z = 0$, то фаза в (13) будет совпадать с (7) при $r \gg r_0$ с точностью до константы. Спиральная волна (13) при $m = 2$ совпадает с кинематической, показанной на рис. 3. Таким образом, динамические волны могут распространяться синхронно с кинематическими, образуя единую сложную структуру.

Отметим, что в новой модели форма спирали возмущений плотности или скорости может совпадать с формой известной спирали Паркера [Parker, 1958] для межпланетного магнитного поля вдали от Солнца. В моделях оказываются сходными области, за пределами которых скорость солнечного ветра предлагается считать постоянной. При этом в новой модели не учитывается магнитное поле, поскольку ставится задача показать кинематическую природу спиральных возмущений. Поскольку вещество и магнитное поле взаимодействуют, реальная форма спиральных возмущений может немного отличаться как от спирали Паркера, так и спирали (7), что согласуется с наблюдениями [Застенкер и др., 2015].

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Данная работа посвящена изучению природы коротящих высокоскоростных потоков из корональных дыр (ВПКД). Подытожим полученные результаты.

1. Предложена кинематическая интерпретация ВПКД. Показано, что наличие коротации высокоскоростных потоков из корональных дыр с Солнцем и их спиральная форма могут быть объяснены в рамках кинематики без привлечения гидродинамики или магнитной гидродинамики.

2. Историческое представление о ВПКД как о потоках вещества, полностью коротящих с источником на Солнце как единое целое, противоречит наблюдениям. На 1 AU плазма, находящаяся в каждый момент времени внутри или вблизи ВПКД, вращается вокруг Солнца в десятки раз медленнее, чем сам ВПКД. В рамках кинематической интерпретации данный факт не приводит к противоречиям.

3. ВПКД состоят в каждый момент времени из разных частиц, выпущенных одним и тем же вра-

щающимся источником на Солнце в отличающихся направлениях.

4. Кинематическая модель ВПКД не противоречит существованию спиральных волн давления и позволяет объяснить совпадение соотношений концентраций тяжелых ионов внутри ВПКД и внутри корональной дыры-источника.

Хотя существует немало моделей ВПКД, согласующихся с наблюдениями, при их построении не уделяется внимание значительному различию скоростей вращения плазмы вокруг Солнца и угловой скорости движения ВПКД. Несмотря на то, что данные о величине обеих скоростей известны, никто не пытался их сравнивать. Приведенные на рис. 1 значения угловой скорости плазмы ожидаемы, также как и то, что произведение 1 AU и угловой скорости Солнца превышает 400 км/с. Но сам факт того, что эти параметры различаются, заслуживает пристального внимания.

Когда заходит речь о движении и крупномасштабной структуре ВПКД, иногда из контекста не ясно, как именно авторы представляют его распространение. Часто речь идет о “вращении потока”. Также можно встретить рассуждения о том, как коротящий с Солнцем SIR/CIR сталкивается с другой структурой сбоку (в нерадиальном направлении), ударяя ее словно хлыстом (см. обсуждение точки зрения в [Khabarova et al., 2016]). Данные представления неявно подразумевают, что ВПКД представляет собой единую струю. Как показано выше, это противоречит наблюдениям и может привести к ошибке в рассуждениях. Назначение новой кинематической модели – ясно продемонстрировать, что ВПКД и составляющие их структуры (SIR/CIR, SI и другие) – это объекты коллективной природы, в сущности той же, что пробки на дорогах или спиральные рукава галактик. Единственное, что нужно для их появления – это непрерывный и движущийся по финитной траектории источник возмущений.

С данной точки зрения вещество в солнечном ветре движется преимущественно радиально, в то время как на 1 AU поверхность, образованная частицами, вышедшей из одной и той же области корональной дыры, имеет форму спирали и коротяет с источником. Поэтому пример нерадиального столкновения некоторой структуры и ВПКД возможен либо из-за наличия ударных волн или сильных разрывов типа токового слоя, движущихся синхронно со спиралью, либо из-за нерадиальной ориентации препятствия, либо из-за искажения ВПКД другими потоками.

Поднятый вопрос взаимодействия ВПКД с другими объектами при боковом столкновении является неспранным. ВПКД могут представлять собой геоэффективные потоки. Как отмечалось в работах [Riley, 2007; Khabarova, 2007], долгое время составные части ВПКД, SIR/CIR, не учитывались при прогнозировании космической погоды.

Самые сильные магнитные бури (до 93%) связаны с мощными корональными выбросами массы (КВМ). Вместе с тем, ВПКД являются более долгоживущими структурами, чем КВМ. Долгоживущие высокоширотные ВПКД могут оказывать длительное регулярное воздействие на магнитосферу в минимуме солнечной активности. А в максимуме солнечной активности низкоширотные ВПКД лежат вблизи плоскости эклиптики и взаимодействуют с магнитосферой почти наверняка. Как было показано лишь треть магнитных бурь связаны с КВМ [Gosling et al., 1991; Ермолаев и Ермолаев, 2009; Ермолаев и др., 2009]. В работах [Riley, 2007; Khabarova, 2007] было отмечено, что высокая геоэффективность ВПКД связана с особенностями их воздействия на магнитосферу. КВМ наносит более резкий удар при приходе фронта ударной волны, а вблизи SIR/CIR происходят большие по амплитуде вариации плотности и магнитного поля в ULF диапазоне, которые могут повышать геоэффективность высокоскоростного потока, предварительно раскачивая магнитосферу, попадая в резонанс с ее собственными частотами. Надеемся, кинематическая интерпретация ВПКД может послужить поводом для ускоренного развития прогнозов, основанных на большем, чем обычно, числе геоэффективных параметров.

Отметим, что КВМ являются основными источниками магнитных бурь в максимуме солнечной активности, а ВПКД — в минимуме [Riley, 2007; Khabarova and Rudenichik, 2002; Хабарова и Руденчик, 2003; Хабарова, 2003].

Примечательно, что в рамках приведенной кинематической модели не так важно, что собой представляет источник на Солнце. С тем же успехом можно рассмотреть вместо корональной дыры непрерывный поток солнечного ветра с зависящими от направления возмущениями. В этом случае можно аналогичным образом показать, что любые структуры в гелиосфере, поддерживаемые непрерывным источником на Солнце, могут коротировать с ним. Движение секторных границ, гелиосферного токового слоя и полярных токовых слоев [Khabarova et al., 2017] может быть изучено более подробно в будущем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за ценные обсуждения и интерес к данному исследованию О.В. Хабаровой и Х.В. Маловой.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликт интересов отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Бескин В.С. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 384 с. 2006.

— Бескин В.С. Магнитогидродинамические модели астрофизических струйных выбросов // УФН. Т. 180. С. 1241–1278. 2010.

<https://doi.org/10.3367/UFN.0180.201012b.1241>

— Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. Т. 8. № 1. С. 5–35. 2009.

<https://ifz.ru/geofizicheskie-procressy-i-biosfera/soderzhanie/tom-8-nomer-1-2009/01>

— Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.

Ефимов А.И., Луканина Л.А., Смирнов В.М., Чашей И.В., Берд М.К., Петцольд М. Детектирование области повышенной турбулентности свехкороны Солнца с использованием спутников VENUSEXPRESS и MARS-EXPRESS // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 3. С. 275–281. 2021.

<https://doi.org/10.31857/S0016794021030044>

Застенкер Г.Н., Храпченков В.В., Колоскова И.В., Гаврилова Е.А., Рязанова Е.Е., Рязанцева М.О., Гагуа Т.И., Гагуа И.Т., Шафранкова Я., Немечек З. Быстрые вариации величины и направления потоков солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 53. № 1. С. 1–12. 2015.

<https://doi.org/10.7868/S0023420615010094>

— Хабарова О.В., Руденчик Е.А. Об особенностях изменения осциляторного режима плотности солнечного ветра и магнитного поля Земли перед магнитными бурями — результаты Вейвлет-анализа // Вестн. Отделения наук о Земле РАН. № 1(21). 2003. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=JAWj_1MAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=JAWj_1MAAAAJ:u_35RYKgDlwC

— Хабарова О.В. Исследование вариаций параметров солнечного ветра перед началом магнитных бурь. Дис. канд. физ.-мат. наук. М.: ИЗМИРАН, 2003. <https://www.researchgate.net/publication/320216049>

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20747.18728>

— Balbus S.A., Hawley J.F. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I. Linear analysis // The Astrophys. J. V. 376. P. 214–222. 1991.

<https://doi.org/10.1086/170270>

— Barnes C.W., Simpson J.A. Evidence for interplanetary acceleration of nucleons in corotating interaction regions // The Astrophys. J. V. 210. P. L91–L96. 1976.

<https://doi.org/10.1086/182311>

— Bochsler P., Lee M.A., Karrer R. et al. Diagnostics of corotating interaction regions with the kinetic properties of iron ions as determined with STEREO/PLASTIC // Ann. Geophysicae. V. 28. № 2. P. 491–497. 2010.

<https://doi.org/10.5194/angeo-28-491-2010>

— Burlaga L.F. Corotating pressure waves without fast streams in the solar wind // J. Geophys. Res. V. 88. № A8. P. 6085–6094. 1983.

<https://doi.org/10.1029/JA088iA08p06085>

— Burlaga L.F., Klein L.W. Configurations of corotating shocks in the outer heliosphere // J. Geophys. Res. V. 91. № A8. P. 8975–8980. 1986.

<https://doi.org/10.1029/JA091iA08p08975>

— Carovillano R.L., Siscoe G.L. Corotating structure in the solar wind // Solar Phys. V. 8. № 2. P. 401–414. 1969.

<https://doi.org/10.1007/BF00155388>

- *Carrington R.C.C.* Observations of the spots on the Sun from November 9, 1853 to March 24, 1861. London: Williams and Norgate. P. 1863.
- *Crooker N.U., Kahler S.W., Larson D.E., Lin R.P.* Large-scale magnetic field inversions at sector boundaries // *J. Geophys. Res.* V. 109. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010278>
- *Dessler A.J.* Solar wind and interplanetary magnetic field // *Rev. Geophys. Space Phys.* V. 5. P. 1–41. 1967.
<https://doi.org/10.1029/RG005i001p00001>
- *Fahr H.-J., Fichtner H.* Physical reasons and consequences of a three-dimensionally structured heliosphere // *Space Sci. Rev.* V. 58. № 1. P. 193–258. 1991.
<https://doi.org/10.1007/BF01206002>
- *Geiss J., Gloeckler G., von Steiger R.* Origin of the solar wind from composition data // *Space Sci. Rev.* V. 72. P. 49–60. 1995.
<https://doi.org/10.1007/BF00768753>
- *Gosling J.T., McComas D.J., Phillips J.L., Bame S.J.* Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* V. 96. P. 7831–7839. 1991.
- *Gosling J.T., Pizzo V.J.* Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure // *Space Sci. Rev.* V. 89. P. 21–52. 1999.
<https://doi.org/10.1023/A:1005291711900>
- *Hundhausen A.J.* Direct observations of solar-wind particles // *Space Science Reviews.* V. 8. № 5–6. P. 690–749. 1968.
<https://doi.org/10.1007/BF00175116>
- *Hundhausen A.J.* Solar wind stream interactions and interplanetary heat conduction // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 34. P. 7996–8010. 1973.
<https://doi.org/10.1029/JA078i034p07996>
- *Insley J.E., Moore V., Harrison R.A.* The differential rotation of the corona as indicated by coronal holes // *Solar Phys.* V. 160. № 1. P. 1–18. 1995.
<https://doi.org/10.1007/BF00679089>
- *Khabarova O.V., Rudenichik E.A.* Wavelet analysis of solar wind and geomagnetic field ULF oscillations. M.: Preprint IZMIRAN. V. 6. 1149 p. September 2002.
- *Khabarova O.V.* Current problems of magnetic storm prediction and possible ways of their solving // *Sun and Geosphere.* V. 2. № 1. P. 33–38. 2007. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007SunGe...2...33K/abstract>
- *Khabarova O.V., Zank G.P., Li G., Malandraki O.E., le Roux J.A., Webb G.M.* Small-scale magnetic islands in the solar wind and their role in particle acceleration. II. Particle energization inside magnetically confined cavities // *The Astrophys. J.* V. 827. 2016.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/827/2/122>
- *Khabarova O., Malandraki O., Malova H. et al.* Current Sheets, Plasmoids and Flux Ropes in the Heliosphere. P. I. 2-D or not 2-D? General and Observational Aspects, *Space Sci. Rev.* V. 217. № 3. 97 p. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00814-x>
- *Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R.A., Zelenyi L.M., Obridko V.N., Kharshiladze A.F., Tokumaru M., Sokół J.M., Grzędzielski S., Fujiki K.* High-latitude conic current sheets in the solar wind // *The Astrophys. J.* V. 836. № 1. 14 p. 2017.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/108>
- *Khabarova O., Sagitov T., Kislov R., Li G.* Automated identification of current sheets — a new tool to study turbulence and intermittency in the solar wind // *J. Geophys. Res.— Space.* V. 126. № 8. 2021b.
<https://doi.org/10.1029/2020JA029099>
- *Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C.* A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream // *Solar Phys.* V. 29. № 2. P. 505–525. 1973.
<https://doi.org/10.1007/BF00150828>
- *Lee M.A.* An analytical theory of the morphology, flows, and shock compressions at corotating interaction regions in the solar wind // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 10491–10500. 2000.
<https://doi.org/10.1029/1999JA000327>
- *Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H.* Solar wind heavy ions over solar cycle 23: ACE/SWICS measurements // *The Astrophys. J.* V. 768. 2013.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/94>
- *Odstrčil D.* Modelling 3-D solar wind structure // *Adv. Space Res.* V. 32. № 4. P. 497–506. 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00332-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00332-6)
- *Parker E.N.* Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields // *Astrophys. J. Lett., V.* 128. P. 664. 1958.
<https://doi.org/10.1086/146579>
- *Parker E.N.* Dynamical theory of the solar wind // *Space Sci. Rev.* V. 4. № 5–6. P. 666–708. 1965.
<https://doi.org/10.1007/BF00216273>
- *Pizzo V.J.* A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind — I. Theoretical foundations // *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 5563–5572. 1978.
<https://doi.org/10.1029/JA083iA12p05563>
- *Pizzo V.J.* A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind — II. Hydrodynamic streams // *J. Geophys. Res.* V. 85. P. 727–743. 1980.
<https://doi.org/10.1029/JA085iA02p00727>
- *Pizzo V.J.* A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind — III. Magnetohydrodynamic streams // *J. Geophys. Res.* V. 87. P. 4374–4394. 1982.
<https://doi.org/10.1029/JA087iA06p04374>
- *Pizzo V.J., Schwenn R., Marsch E., Rosenbauer H., Mühlhäuser K.-H., Neubauer F. M.* Determination of the solar wind angular momentum flux from the Helios data — an observational test of the Weber and Davis theory // *The Astrophys. J.* V. 271. P. 335–354. 1983.
<https://doi.org/10.1086/161200>
- *Pizzo V.J.* The evolution of corotating stream fronts near the ecliptic plane in the inner solar system — II. Three-dimensional tilted-dipole fronts // *J. Geophys. Res.* V. 96. P. 5405–5420. 1991.
<https://doi.org/10.1029/91JA00155>
- *Pizzo V.J., Gosling J.T.* Three-dimensional simulation of high-latitude interaction regions: Comparison with Ulysses results // *J. Geophys. Res. Lett.* V. 21. № 18. P. 2063–2066. 1994.
<https://doi.org/10.1029/94GL01581>
- *Richardson I.G.* Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 15. № 1. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>
- *Riley P.* Modeling corotating interaction regions: from the Sun to 1 AU // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* V. 69. P. 32–42. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.06.008>
- *Wimmer-Schweingruber R.F., von Steiger R., Paerli R.* Solar wind stream interfaces in corotating interaction regions: SWICS/Ulysses results // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A8. P. 17407–17418. 1997.
<https://doi.org/10.1029/97JA00951>
- *Zhao L., Landi E., Fisk L.A., Lepri S.T.* The coherent relation between the solar wind proton speed and O^{7+}/O^{6+} ratio and its coronal sources // *AIP Conf. Proc.* V. 1720. № 1. 020007. 2016.
<https://doi.org/10.1063/1.4943808>