

**ИСТОЧНИКИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ  
И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА  
ВО ВНЕШНЕЙ КОРОНЕ СОЛНЦА**

**А.В. Кудрявцева, Д.В. Просовецкий**

**THE SOURCES OF SMALL-SCALE SOLAR WIND INHOMOGENEITIES  
AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE SOLAR WIND STREAMS  
IN THE OUTER CORONA OF THE SUN**

**A.V. Kudryavtseva, D.V. Prosovetsky**

Исследованы динамические параметры солнечного ветра (СВ) в низкоширотных и полярных областях солнечной короны на расстоянии от 3.5 до 16 солнечных радиусов по данным коронографов STEREO/COR2. Для определения параметров солнечного ветра использовались мелкомасштабные неоднородности в потоке СВ, имеющие вытянутую форму, размеры от 1 до 3 солнечных радиусов и перемещающиеся со скоростью потока. В результате исследования было установлено, что потоки СВ наблюдаются как в приэкваториальных, так и в приполярных широтах. Также СВ испытывает значительные вариации скорости в пределах одного потока с ускорениями обоих знаков. В результате анализа данных наблюдений было найдено, что распределение скоростей и ускорений в зависимости от расстояния от фотосферы для низкоширотного и полярного солнечного ветра не отличаются, а возможным его источником являются области пониженной концентрации в корональных дырах.

Kinematic characteristics of solar wind (SW) in polar and low-latitude regions of solar corona according to STEREO/COR2 chronograph data from 3.5 to 16 solar radii were investigated. To determine parameters of SW small-scale inhomogeneities inside the wind flux were used. They have an elongated shape, size about 1 - 3 solar radii in radial direction and velocity of ambient solar wind. It was found, that solar wind outflows have jets shape and existence at all latitudes from polar to equatorial regions. Also SW has significant variations of velocity and acceleration with both sign within same flow. A result of data analysis shows that distribution of velocity and acceleration from photosphere doesn't differ for polar and low-latitude solar wind. And regions of lower density with respect to ambient plasma in coronal holes are possible sources of solar wind.

Принято считать, что динамические характеристики потоков солнечного ветра в короне хорошо известны. Как правило, предполагается монотонный рост скорости с медленно уменьшающимся ускорением от нижней короны и до десятков радиусов Солнца [Sheeley, 1997; Cranmer, 2009]. Однако, современные внеатмосферные наблюдения с высоким пространственным и временным разрешением движения неоднородностей в потоках СВ во внешней короне Солнца по данным коронографов в белом свете [Sheeley, 1997; Jones, 2009; Jackson, 2014] показывают, что при распространении СВ могут существовать существенные вариации скорости [Jones, 2009; Jackson, 2014] и ускорения [Jones, 2009] на малых пространственных масштабах (порядка радиуса Солнца). Причины таких вариаций до сих пор не объяснены, так же как и наличие неоднородностей в потоках СВ, источники которых, очевидно, лежат на нижних уровнях солнечной атмосферы.

В настоящей работе для изучения кинематических характеристик СВ в полярных и низкоширотных областях солнечной короны использовались данные коронографов COR2 космических аппаратов STEREO от 3.5 до 16 солнечных радиусов и данные AIA/SDO для определения возможных источников СВ. Для исследования был выбран относительно спокойный период с января по июнь 2012 г., когда на северном и южном полюсах Солнца присутствовали хорошо различимы корональные дыры (КД) и даты, когда на лимбах Солнца для текущего положения STEREO в низкоширотных областях находились КД. Из обработки исключались временные промежутки, когда происходили КВМ (по существующим каталогам). Как и в работах [Sheeley,

1997; Jones, 2009; Jackson, 2014], изучалось движение неоднородностей в потоках СВ.

На изображениях COR2 неоднородности выглядели более яркими особенностями в потоках СВ, наблюдались на всех позиционных углах и во все дни наблюдений, имели вытянутую форму в виде струй. Их радиальные размеры составляли от 1 до 3 солнечных радиусов, поперечные размеры – от 50 до 80 тыс. км. По мере удаления от Солнца они становились менее яркими, постепенно сливаясь с окружающей средой.

Из данных коронографов COR2, получаемых каждые 15 мин, рассчитывалась «бегущая разность» для каждой соседней пары изображений. На разностных изображениях выделялись диапазоны позиционных углов по направлению распространения неоднородностей, в этих диапазонах производилось поперечное усреднение для каждой точки в направлении от Солнца. Результатом такой обработки являлось радиальное распределение изменений яркости между двумя изображениями при движении каждой неоднородности. Из полученных распределений строились высотно-временные диаграммы протяженностью до суток по временной координате. Поскольку контрастность потоков СВ мала, реперными точками для определения их параметров выбирались передний и задний фронты неоднородностей в потоках. Для этих фронтов для каждого времени наблюдений определялось расстояние от центра Солнца. По полученным координатам вычислялись скорости и ускорения потоков СВ.

В результате обработки данных наблюдений было обнаружено, что скорость СВ всегда значительно изменяется в пределах одного потока (примеры на рис. 1, а, б), имеются участки положительного и отри-

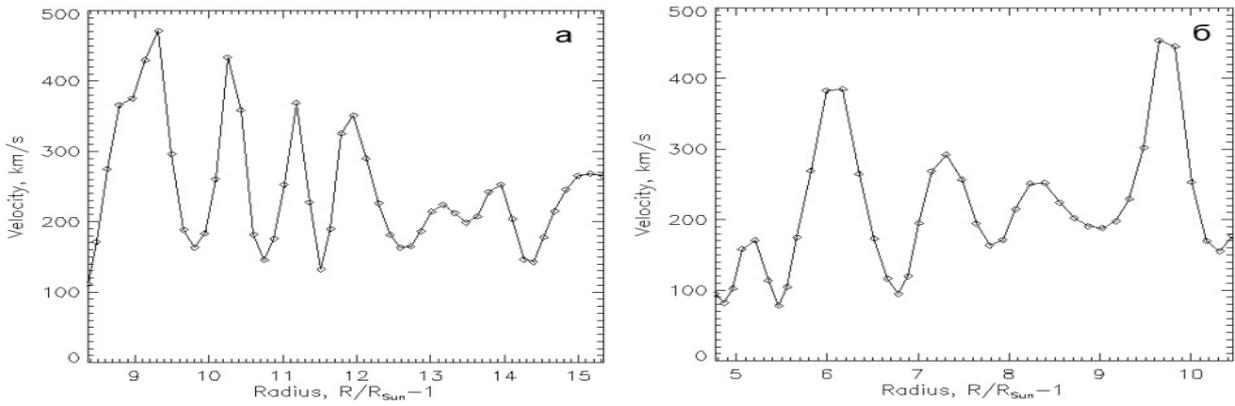


Рис. 1. Примеры зависимостей скорости СВ от расстояния в низкоширотной (а) и полярной областях (б). Ромбами отмечены точки наблюдений.

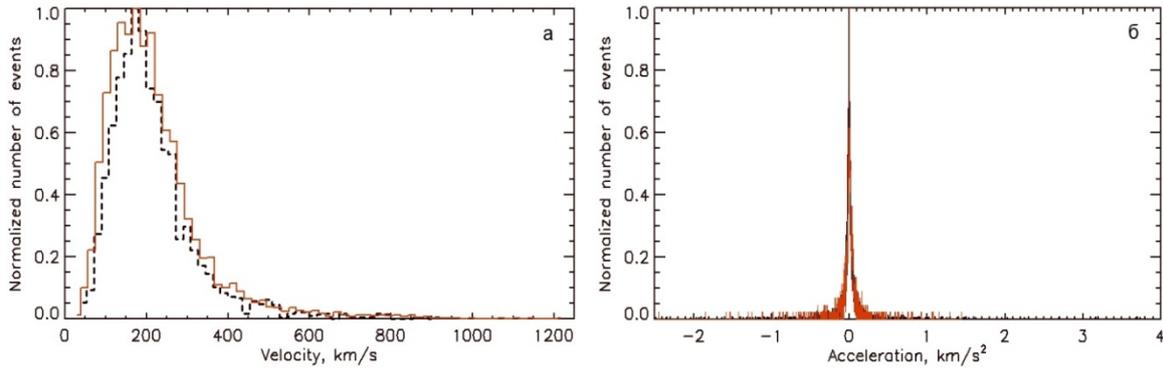


Рис. 2. Нормализованная гистограмма для скоростей (а) и ускорений (б) СВ в полярных и низкоширотных областях солнечной короны. Красным цветом показаны результаты для полярных областей, черным – для низкоширотных.

цательного ускорения. Такое поведение потоков СВ наблюдалось как в низкоширотных (рис. 1, а), так и в полярных (рис. 1, б) областях солнечной короны. В каждом потоке СВ наблюдались скорости, характерные для медленной и высокоскоростной компонент солнечного ветра.

На рис. 2 видно, что нормированные частотные распределения значений скоростей и ускорений для низкоширотных и полярных областей практически не отличается. Значения скоростей находятся в диапазоне от 44–918 км/с для низкоширотных областей и от 40–1200 км/с в полярных (рис. 2, а), ускорения лежат в диапазоне от  $-1.6$  до  $0.9$  км/с<sup>2</sup> и  $-2.4$  до  $3.7$  км/с<sup>2</sup> (рис. 2, б) соответственно.

Имеется основной пик вблизи 200 км/с, соответствующий низкоскоростному СВ, и достаточно длинный высокоскоростной хвост, который соответствует высокоскоростному СВ, так как даты для наблюдений на низких широтах были выбраны так, чтобы наблюдались высокоскоростные потоки из рекуррентной экваториальной корональной дыры, ожидался больший вклад высоких скоростей в гистограмму (рис. 2, а, пунктирная черная линия). Кроме того, известно, что над полюсами Солнца постоянно существуют полярные корональные дыры, солнечный ветер из которых должен иметь высокие скорости (рис. 2, а, сплошная красная линия). Однако в результате исследования было установлено, что основная часть скоростей потоков СВ имеет значения  $190 \pm 70$  км/с как для полярных, так и для низкоширотных областей солнечной короны, что больше характерно для медленной компоненты СВ.

Для выяснение возможных источников потоков СВ было исследовано распределение дифференциальной меры эмиссии (DEM) в областях Солнца, расположенных на лимбе для STEREO и находящиеся в пределах исследуемых позиционных углов распространения потоков СВ. Удалось обнаружить области пониженной концентрации корональной плазмы в таких областях, по размерам соответствующие поперечным размерам оснований неоднородностей в нижней короне. На рис. 3, в отмечен участок КД, возможно являющийся источником одного из исследованных потоков СВ. Размер очерченной области составляет  $\sim 60$  тыс. км., среднее значение DEM в этой области при корональных температурах на порядок меньше окружающей атмосферы.

Таким образом, обнаружено наличие мелкомасштабных неоднородностей в потоках СВ на всех широтах, определены их кинематические и пространственные характеристики, одинаковые для низкоширотных и полярных областей. Обнаруженное изменение скоростей и ускорений СВ в пределах одного потока могут быть связаны как с действием магнитогидродинамических сил в короне, так и дисперсией частиц по скоростям на границах потоков. На наличие сил, приводящих к ускорениям частиц СВ во внешней короне указывалось, например, в работе [Ofman, 1998]. Механизмом резкого изменения скорости частиц в этой работе указывалось ускорение СВ в результате его взаимодействия с высокоамплитудными нелинейными волнами, возможно альфвеновскими. Характерный пространствен-

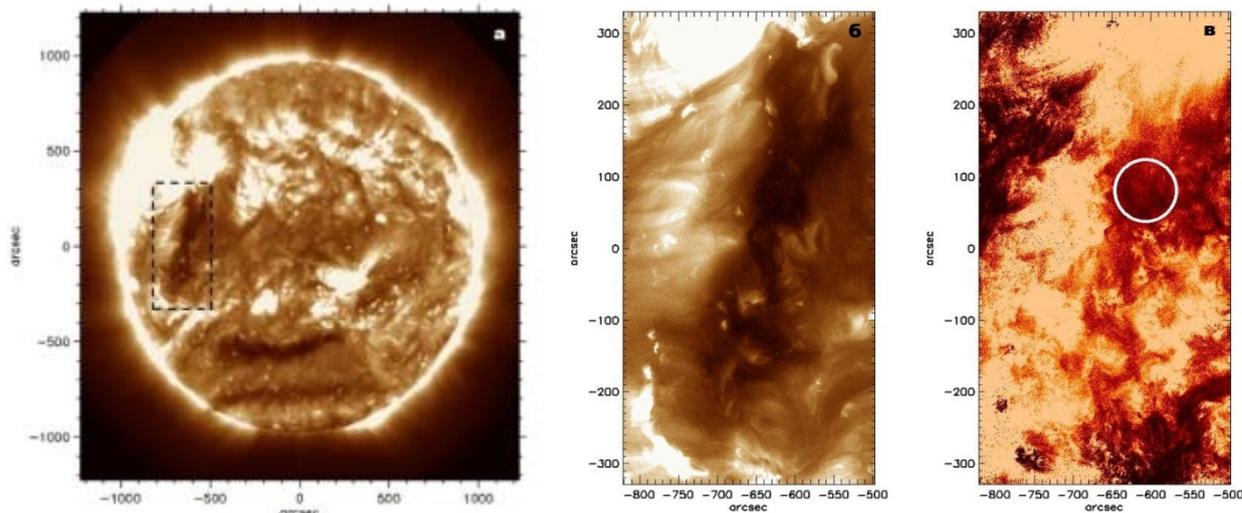


Рис. 3. Возможный источник неоднородностей потока СВ в солнечной короне: *a* – данные AIA/SDO 193 Å 13 февраля 2012 г.; *б* – участок солнечной атмосферы с КД, выделенный на (*a*) пунктиром; *в* – распределение DEM при кинетической температуре  $T_{кин} = 10^6$  К по КД и окружающим областям. Окружностью выделен возможный источник потока СВ.

ный масштаб (1–2 радиуса Солнца) изменения скорости в пределах изменения знака ускорения, полученный в данной работе, совпадает с рассчитанным в [Ofman, 1998] для частоты волн 3.33 мГц. С одной стороны колебания с такой частотой наблюдаются в СВ вблизи земной орбиты, а с другой являются одной из основных сейсмических мод Солнца.

Отметим также, дисперсия частиц по скоростям в пределах одного потока в соответствии с распределением скоростей (рис. 2, *a*), дает вблизи земной орбиты характерную форму высокоскоростного СВ, источником которого являются КД, с резким ростом скорости на переднем фронте и последующим относительно медленным спадом. Поскольку потоки СВ со значительной дисперсией скоростей наблюдаются на всех широтах от полярных до экваториальных, то это делает затруднительным соотнесение медленных или быстрых потоков СВ с определенными корональными структурами, а указывает лишь на относительное содержание быстрых и медленных частиц в них.

Работа выполнена в рамках базового проекта П.16.1.6. «Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cranmer S.R. Coronal holes // *Living Rev. SolPh.* 2009. V. 6. P. 3.  
 Jackson B.V., et al. The dynamic character of the polar solar wind // *ApJ.* 2014. V. 793. P. 54.  
 Jones S.I., Davila J.M. Localized plasma density enhancements observed in STEREO COR1 // *ApJ.* 2009. V. 701, iss. 2. P. 1906–1910.  
 Ofman L., Davila J.M. Solar wind acceleration by large-amplitude nonlinear waves: Parametric study // *JGR.* 1998. V. 103, iss. A10. P. 23677–23690.  
 Sheeley N.R., et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and 30  $R_{\odot}$  // *ApJ.* 1997. V. 484. P. 472–478.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*