

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ КА STEREO

А.В. Кудрявцева, Д.В. Просовецкий

RESEARCH INTO SOLAR WIND PARAMETERS FROM STEREO SATELLITE DATA

A.V. Kudryavtseva, D.V. Prosovetsky

Исследованы параметры и кинематические характеристики неоднородностей солнечного ветра на расстояниях $(4\div 14)R_{\odot}$ по данным коронографов STEREO/COR2. Измерены значения скоростей и ускорений неоднородностей в зависимости от расстояния до Солнца, построено их распределение, в котором выделены быстрый и медленный компоненты солнечного ветра. Оценена электронная концентрация неоднородностей в быстром и медленном компонентах ветра.

Parameters and kinematic characteristics of inhomogeneities in solar wind from STEREO/COR2 coronagraphs data at distances of $(4\div 14)R_{\odot}$ were investigated. Velocities and accelerations of inhomogeneities depending on distance from the Sun were measured, and their distributions were obtained. Fast and slow components of solar wind were identified. Electron density of inhomogeneities in fast and slow components of the wind was estimated.

Характеристики солнечного ветра (СВ) хорошо изучены только вблизи орбиты Земли. Параметры СВ вблизи Солнца, где происходит генерация и последующее ускорение частиц плазмы до сверхзвуковых скоростей, известны далеко не полностью. До сих пор точно не определены источники СВ, механизмы и высоты ускорения, особенности распределения скоростей медленного и быстрого компонентов СВ в солнечной атмосфере [Cranmer, 2004]. Еще меньше известны законы распространения СВ в межпланетном пространстве.

Из-за сложности наблюдений наименьшие сведения получены о СВ в верхней короне Солнца. Такие наблюдения возможны только с помощью внеатмосферных коронографов, обладающих хорошей чувствительностью и пространственным разрешением. Таким условиям на настоящий момент отвечают коронографы, установленные на космических аппаратах (КА) STEREO [Howard et al., 2008].

Для обработки использовались изображения короны в белом свете, получаемые коронографами КА STEREO на расстояниях $(4\div 15)R_{\odot}$. На этих изображениях СВ наблюдается как непрерывный поток с неоднородностями, называемыми «блоссами» (англ. blob), которые могут служить пассивными индикаторами скорости плазмы, поскольку перемещаются вместе с потоком в радиальном направлении от Солнца [Wang et al., 1998; Jones et al., 2009; Howard et al., 2012]. Также исследовалась возможная связь потоков СВ с корональной дырой (КД), существовавшей в течение нескольких кэррингтоновских оборотов в 2012 г. Даты наблюдений выбирались из условия нахождения КД вблизи западного или восточного лимбов Солнца по направлению к Земле для STEREO-B и STEREO-A соответственно. Такие потоки СВ в дальнейшем могут наблюдаться вблизи земной орбиты.

Был выбран период наблюдений с февраля по июнь 2012 г. Данные, полученные с КА STEREO-A, оказались непригодными для обработки из-за высокого уровня шума на изображениях. На данных коронографов COR1 КА STEREO-A и STEREO-B присутствовала сильная дифракция, что также не позволило использовать эти данные. Поэтому для исследования использовались только данные, полученные прибором COR2-B. Для каждой из этих дат с

использованием библиотек SolarSoft для IDL был сформирован куб данных и получены разностные изображения, на которых выделялись блоссы. Время наблюдений с наибольшим количеством корональных выбросов массы (КВМ) исключалось при обработке с учетом данных каталогов КВМ STEREO/COR1 и SOHO/LASCO. Кроме того, наличие КВМ проверялось по отсутствию диммигов на изображениях в линии FeXII 195 Å.

В исследованных данных наблюдались блоссы разной интенсивности. Периодичности в появлении блоссов обнаружено не было – с каждым оборотом Солнца их количество менялось произвольно. Определялись параметры только самых ярких и контрастных блоссов, которые наблюдались в течение нескольких часов и обладали хорошо выделяемой границей. За весь период наблюдений было выделено двенадцать таких неоднородностей, которые по форме разделялись на два типа: имеющие форму эллипса (семь неоднородностей) и вытянутые по направлению от Солнца (пять неоднородностей). Несмотря на то, что позиционный угол распространения неоднородностей согласовывался с положением КД на лимбе, исключить как источник их появления участки спокойного Солнца невозможно, поскольку на протяжении одного дня могли одновременно наблюдаться оба вида неоднородностей.

Наблюдавшиеся блоссы имели размеры, сопоставимые с радиусом Солнца, от 1 до $3R_{\odot}$ в радиальном направлении. Поперечный размер неоднородностей в потоке СВ составлял 50–80 тыс. км. С учетом радиальной расходимости силовых линий магнитного поля их размеры на уровне фотосферы могут составлять порядка 30 тыс. км, что соответствует характерным размерам ячеек супергрануляции. Этот факт согласуется с предположениями о хромосферной сетке как источнике солнечного ветра [Aschwanden, 2004].

Для обнаруженных неоднородностей на расстояниях от 5 до $14R_{\odot}$ были вычислены скорости и ускорения. Скорости различных неоднородностей имели значения от 50 до 700 км/с, ускорение имело как положительные, так и отрицательные значения в диапазоне от -0.2 до 0.38 км/с². На рис. 1 показано распределение скоростей и ускорений в зависимости от расстояния до Солнца для всех обработанных разностных изображений. Можно видеть, что СВ на

расстояниях больше $8.5R_{\odot}$ четко разделяется на два компонента: со скоростями до 350 км/с и со скоростями до 700 км/с. Две ветви имеют разный диапазон значений ускорений. Неоднородности, соответствующие быстрой ветви, продолжают ускоряться на расстояниях, по крайней мере, до $9.5R_{\odot}$. Ускорение медленной ветви имеет значения, близкие нулю, что свидетельствует о том, что на расстояниях больше $6R_{\odot}$ ускорения не происходит. Вероятно, эти компоненты соответствуют потокам медленного и быстрого СВ.

В работах [Wang et al., 1998; Jones et al., 2009] было получено подобное распределение скоростей, но авторы не выделяли компоненты. В работе [Jones et al., 2009] также были получены отрицательные значения ускорения для некоторых блобсов, что подтверждает правильность предположения о замедлении неоднородностей. Вероятно, различия в скорости, форме и размерах блобсов свидетельствуют о различных источниках возникновения неоднородностей в КД и на спокойном Солнце.

Как известно, в результате расходимости потоков СВ в них падает концентрация частиц по мере удаления от Солнца. Поэтому неоднородности перестают различаться визуально, когда концентрация частиц в них уменьшается и становится сравнимой с концент-

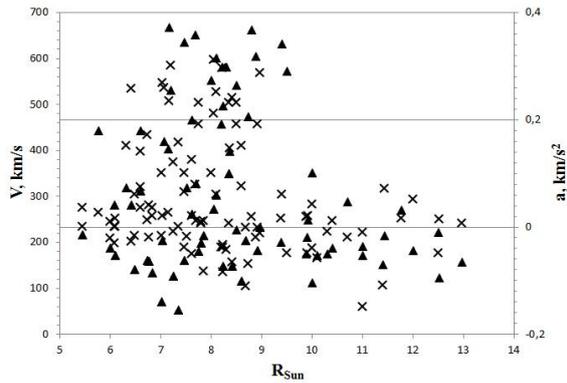


Рис. 1. Распределение значений скоростей неоднородностей СВ (левая вертикальная ось, треугольники) и ускорений (правая вертикальная ось, крестики) в зависимости от расстояния, выраженного в радиусах Солнца.

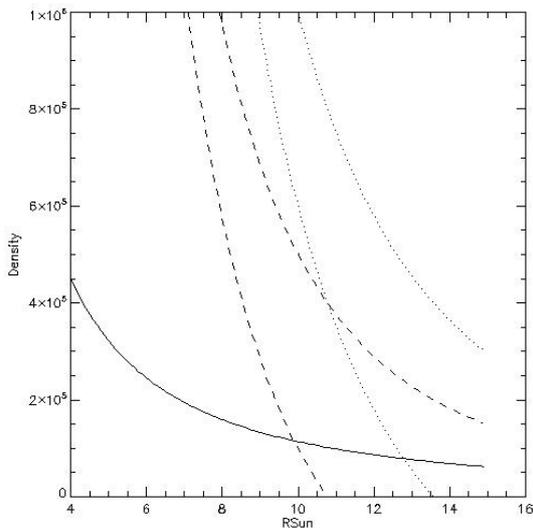


Рис. 2. Изменение электронной концентрации в F-короне Солнца (сплошная линия), в неоднородностях СВ в КД (пунктир) и на спокойном Солнце (точки).

рацией окружающей короны. Из рис. 1 видно, что неоднородности быстрой ветви перестают выделяться на расстоянии около $8R_{\odot}$, а медленной – около $14R_{\odot}$.

Можно показать, что концентрация плазмы в неоднородностях СВ становится сравнимой с электронной концентрацией в F-короне Солнца. Эта концентрация F-короны была рассчитана по эмпирической формуле Баумбаха–Аллена (1) на расстояниях около $10R_{\odot}$ и $13R_{\odot}$ для быстрого и медленного компонентов СВ [Aschwanden, 2004].

$$n_e(h) = 10^8 [0.036R^{-1.5}]. \quad (1)$$

Концентрация частиц в короне спокойного Солнца принята равной 10^9 см^{-3} , плотность в основании корональной дыры $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ [Curd et al., 2004; Dwivedi, Mohan, 1995], величина вариаций в концентрации неоднородностей была взята равной $0.4 \cdot 10^6$ как для спокойного Солнца, так и для КД. Уменьшение концентрации в неоднородностях СВ рассчитывалось из соотношений увеличения объема с удалением от Солнца. На рис. 2 показаны зависимости концентрации в зависимости от расстояния.

В результате проведенной работы определено, что поток СВ от приэкваториальных и полярных областей Солнца неоднороден по своей структуре: в нем наблюдаются неоднородности с характерными радиальными размерами $1 \div 3R_{\odot}$ и поперечными размерами менее $0.1R_{\odot}$. Полученные значения позволяют сделать предположение, что возможным источником блобсов может являться супергрануляция. Найдены значения скоростей неоднородностей, выделены два компонента СВ (быстрый и медленный) на расстоянии нескольких солнечных радиусов от Солнца и определено приблизительно расстояние, на котором происходит разделение потоков СВ, равное $(5.5 \div 6)R_{\odot}$. Получено, что ускорения компонентов СВ различаются. Оценены концентрации неоднородностей при помощи эмпирической формулы Баумбаха–Аллена для быстрого и медленного компонентов СВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aschwanden M.J. Physics of Solar Corona. Springer PRAXIS. 2004. 841 с.
- Cranmer S.R. Coronal heating versus solar wind acceleration // Proc. SOHO 15 Workshop «Coronal heating», St. Andrews, Scotland, 6–9 September 2004.
- Curd W., Landi E., Feldman U. The SUMER spectral atlas of solar coronal features // Astron. Astrophys. 2004. V. 427. P. 1045.
- Dwivedi B.N, Mohan A. On the electron density in a coronal hole // Solar Phys. 1995. V. 156, N 1. P. 197–199.
- Howard R.A., Moses J.D., Vourlidas A., et al. Sun–Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI) // Space Sci. Rev. 2008. V. 136, iss. 1–4. P. 67–115.
- Howard T.A., DeForest C.E., Reinard A.A. White-light observations of the solar wind transients and comparison with auxiliary data // Astrophys. J. 2012. V. 754, iss. 2. P. 10.
- Jones S.I., Davila J.M. Localized plasma density enhancements observed in STEREO COR1 // Ibid. 2009. V. 701, iss. 2. P. 1906–1910.
- Wang Y.-M., Sheeley N.R., Walters J.H. et al. Origin of streamer material in the outer corona // Ibid. 1998. N L 498. P. L165–L168.