

УДК 523.62 – 726

МЕДЛЕННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР: ИСТОЧНИКИ И КОМПОНЕНТЫ СТРУЙНОЙ СТРУКТУРЫ В МАКСИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

К.В. Владимирский, Н.А. Лотова¹, В.Н. Обридко¹

Анализируются результаты сопоставления нескольких независимых наборов экспериментальных данных, характеризующих потоки солнечного ветра. Получена корреляционная зависимость параметров потоков, демонстрирующая основную роль напряженности магнитного поля в короне, как фактора, определяющего интенсивность процессов ускорения потоков солнечного ветра.

Медленный солнечный ветер ($V \leq 400$ км/с), сложность и изменчивость его пространственной структуры, условия его возникновения стали предметом многих исследований последних лет [1 – 5]. Настоящая работа посвящена исследованию роли магнитных полей солнечной короны в формировании потоков медленного солнечного ветра в сложную эпоху максимума солнечной активности. В годы, далекие от максимума, источником медленных потоков солнечного ветра является, преимущественно, область малых гелиоширот [2, 6 – 9]. В годы максимума активности, в условиях переполюсовки магнитного поля Солнца, естественно ожидать возникновения медленных потоков во всей гелиосфере [2, 6, 10, 11].

Конкретные механизмы возникновения потоков солнечного ветра различных типов, как быстрых, так и медленных, изучены в настоящее время недостаточно. Наиболее подробно представлены в литературе исследования медленных потоков солнечного ветра, возникающих в стримерах, которые до последнего времени рассматривались как единственный тип источников таких потоков [8 – 11]. Общая качественная картина, связь

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, РАН.

скорости потоков, измеренных на больших расстояниях от Солнца, с напряженностью магнитного поля в короне была представлена в работе [12]. Более детальные сведения о механизме формирования медленных потоков солнечного ветра были получены в экспериментальных и теоретических исследованиях структуры потоков в начальной фазе, в области источников [7, 8, 11, 13 – 15]. В настоящей работе изучение медленных потоков солнечного ветра проводится с использованием корреляционного подхода, развитого в работах [16 – 18]. Анализируются результаты сопоставления нескольких независимых наборов экспериментальных данных. Используются наблюдения рассеяния радиоволн вблизи Солнца, на околосолнечной плазме, которые проводились на крупных радиотелескопах РАН, г. Пушино. Данные о напряженности и структуре магнитного поля в короне получались решением уравнений поля в области $R_S \leq R \leq 2.5R_S$. В качестве граничных условий использовались результаты оптических измерений на поверхности Солнца, на сфере $R = R_S$, проведенных Солнечной обсерваторией Стенфордского университета, США. Для уточнения данных о структуре течения в области источников использовались также оптические наблюдения белой короны Солнца, выполненные с применением коронографа LASCO, помещенного на КА SOHO.

Данные радиоастрономических наблюдений и магнитных полей в короне. Радиоастрономические наблюдения рассеяния радиоволн на околосолнечной плазме представляют основу изучения струйной структуры солнечного ветра. Традиционными здесь являются наблюдения мерцаний квазаров на больших, $R \sim 0.5 - 1.0 \text{ a.e.}$, расстояниях от Солнца. Наиболее полные результаты были получены в работах [2, 19, 20]. В лаборатории солнечно-земных связей Нагойского университета, Япония, ежегодно, начиная с 1973 г., получают радиокарты пространственного распределения скоростей в солнечном ветре на больших расстояниях от Солнца, $R \geq 0.5 - 1.0 \text{ a.e.}$ [2, 12]. Эти карты обнаруживают струйную структуру потока, но по ним трудно восстановить исходные координаты потоков в области источников солнечного ветра.

Наши исследования направлены на изучение струйной структуры потока вблизи Солнца, на расстояниях $R \sim 10 - 40R_S$, что является более сложной экспериментальной задачей, но позволяет непосредственно связать параметры ускоренных потоков плазмы с данными о магнитных полях в короне. Трудности изучения солнечного ветра вблизи Солнца связаны с тем, что число квазаров, сближающихся с Солнцем на малых расстояниях $R \leq 10R_S$, невелико, а сами квазары в диапазоне коротких волн, которые необходимы для наблюдения здесь мерцаний, являются слабыми источниками. Ввиду этого в наших экспериментах измерения радиальной зависимости угла рассеяния $2\theta(R)$

с использованием излучения квазаров в метровом диапазоне длин волн были дополнены измерениями индекса мерцаний $m(R)$ по наблюдениям мазерных источников линии водяного пара, $\lambda = 1.35$ см.

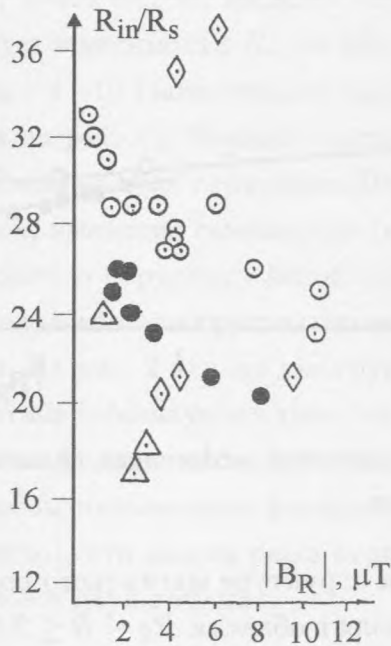


Рис. 1. Корреляционная зависимость геометрии внутренней границы переходной области солнечного ветра R_{in} от напряженности солнечных магнитных полей в короне $|B_R|$ на уровне $R = 2.5R_s$.

Отклонения потоков солнечного ветра от радиального направления на расстояниях порядка немногих десятков радиусов Солнца невелики, и поэтому временные и угловые координаты радиоастрономических наблюдений непосредственно переносятся на область источников солнечного ветра, на условную "поверхность источника", сферу радиуса $2.5R_s$, которая рассматривалась как область начала ускорения потоков околосолнечной плазмы. Таким образом, создалась уникальная возможность сопоставить данные об ускорении и скорости потоков плазмы с данными о магнитном поле в области источников. Многодневные наблюдения смещающихся на небесной сфере источников позволяют получить зависимость рассеяния от прицельного расстояния луча зрения от Солнца. В качестве параметра, характеризующего интенсивность ускорения потока, используется определенное из радиальной зависимости рассеяния расстояние от Солнца

внутренней границы переходной, трансзвуковой области R_{in} . Более близкое к Солнцу расположение границы R_{in} соответствует более интенсивному ускорению плазмы и большим скоростям потоков [21].

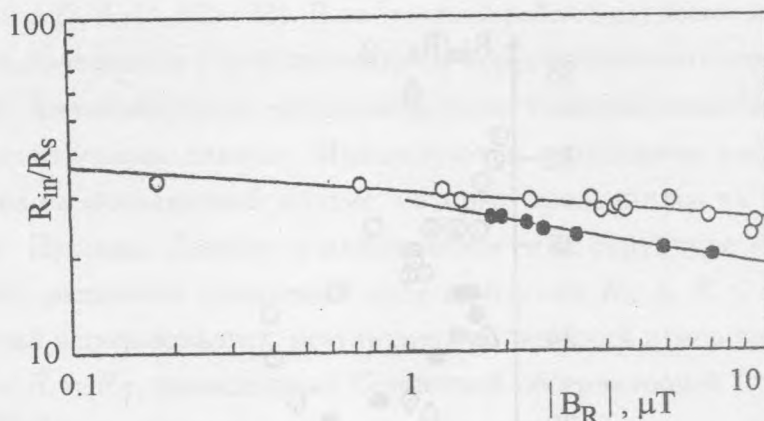


Рис. 2. Две основные группы потоков медленного солнечного ветра. Прямые проведены способом наименьших квадратов.

Данные о напряженности и структуре магнитного поля в области источников получались решением уравнений поля в области $R_S \leq R \leq 2.5R_S$. Вычисления выполнялись в потенциальном приближении по методу Хоксимы и Обридо [22, 23]. Результаты вычислений представлялись в двух видах: определялись абсолютные значения радиальной компоненты поля на поверхности источника $|B_R|$, согласованные по времени и по угловым координатам с моментом регистрации R_{in} , внутренней границы переходной области. Помимо этого, были получены данные о закрытом или открытом типе структуры магнитных силовых линий в области источников с тем, чтобы иметь возможность судить об условиях проникновения в замороженное магнитное поле в потоки солнечного ветра.

В табл. 1 собраны 29 комплектов экспериментальных данных о потоках солнечного ветра, полученных в 2000 году, в максимуме солнечной активности. Основное содержание таблицы – пары значений параметров R_{in}/R_S и $|B_R|$. В таблице указаны названия использованных источников, дата регистрации R_{in} , геометрия просвечивания (E или W и φ), результаты расчетов магнитного поля – напряженность поля на поверхности источников $|B_R|$ и структура поля – открытый, замкнутый или смешанный тип конфигурации силовых линий. В последнем столбце приведены данные о структуре белой короны, полученные по наблюдениям на коронографе LASCO, на КА SOHO.

Обсуждение результатов. Содержащиеся в табл. 1 параметры R_{in} и $|B_R|$ представляют важные характеристики интенсивности процесса ускорения потоков солнечного ветра и условий в области источников потоков, соответственно. Корреляционная диаграмма, рис.1, показывает основной результат сопоставления значений R_{in} и $|B_R|$ – на поле точек, по-видимому, хаотическом, выделяются группы, образующие близкую к однозначной корреляционную зависимость R_{in} от $|B_R|$. Данные табл. 1 содержат две такие группы экспериментов – 4–10 (заполненные кружки на диаграмме рис. 1) и 11–24 (незаполненные кружки на рис. 1). Первой группе соответствуют потоки, имеющие в качестве источников основное тело стримеров. Второй, наиболее многочисленной группе, соответствуют потоки, имеющие смешанную (замкнутую и открытую) структуру магнитного поля и лучистую структуру белой короны в области источников. По результатам процесса ускорения обе эти группы экспериментов относятся к потокам медленного солнечного ветра. На рис. 2 эти же две группы точек R_{in} , $|B_R|$ представлены в логарифмическом масштабе (обозначения здесь те же, что и на рис. 1). Обе ветви характеризуются корреляционной зависимостью, близкой к линейной. Аппроксимирующие прямые проведены способом наименьших квадратов и имеют различные наклоны (-0.182 и -0.075 , соответственно), что можно рассматривать как независимое указание на различную природу потоков в двух группах.

Т а б л и ц а 1

Структура потока солнечного ветра по радиоастрономическим данным и магнитным полям короны 2000 г.

N	источник	дата 2000	E/W	φ , град.	R_{in}/R_s	$ B_R $, μT	структура магнитного поля B_R	структура белой короны
1	3C133	09.06	E	14.0	24	06	открытая	боковой
2	S255	22.06	E	-82.0	18	3.1		лепесток
3	S255	24.06	W	-79.0	17	2.65		стримера

N	источник	дата 2000	E/W	φ , град.	R_{in}/R_S	$ B_R $, μT	структура магнитного поля B_R	структура белой короны		
4	3C2	16.03	E	-9.4	20	8.13	замкнутая	стример		
5	IRS-20431	17.12	E	16.0	26	1.81				
6	3C225	09.08	E	-2.0	26	1.95				
7	3C133	21.06	W	29.0	25	2.33				
8	3C144	22.06	W	-4.0	24	2.60				
9	3C228	24.08	W	12.0	23	3.25				
10	3C228	12.08	E	9.0	21	5.86				
11	3C138	15.06	W	-51.0	29	6.11			смешанная	лучистое свечение
12	IRC-20431	01.01	W	5.0	33	0.18				
13	W31(2)	16.12	E	30.0	32	0.74				
14	W28A2(1)	30.12	W	-11.4	31	1.30				
15	3C225	24.08	W	3.0	29	1.47				
16	3C215	15.08	W	5.0	29	2.39				
17	3C138	07.06	E	-66.0	29	3.60				
18	3C208	11.08	W	-26	28	4.38				
19	3C212	12.08	W	-17.8	27.5	4.26				
20	3C207	07.08	W	-35.0	27	4.58				
21	3C245	25.08	E	40.0	27	2.87				
22	3C172	28.06	E	14.0	26	7.94				
23	3C154	30.06	W	32.0	25	10.91				
24	3C166	26.06	E	-22.0	23	10.54				
25	3C2	25.03	W	-5.4	21	4.06	сложные структуры вблизи темной области			
26	3C5	18.03	E	-5.8	20	3.54				
27	3C5	29.03	W	-1.4	21	9.66				
28	W31(2)	02.01	W	14.3	35	4.53				
29	GGD4	27.06	W	9.9	37	6.65				

Эксперименты 1 – 3 в табл. 1 (треугольники на рис. 1) – это быстрый солнечный ветер, скудно представленный в максимуме солнечной активности и подробно исследованный в других фазах [17, 18]. В данных 2000 года обнаружены также неизвестные ранее наиболее низкоскоростные потоки, которые не обнаруживают регулярной корреляционной зависимости хода ускорения от напряженности магнитного поля (эксперименты 25 – 29 в табл. 1, ромбы

на рис. 1). Эти потоки немногочисленны, их происхождение можно связать с особо сложной структурой магнитных полей в области источников.

Предельно простая аналитическая форма найденной выше корреляционной зависимости, связывающей интенсивность ускорения солнечного ветра с напряженностью магнитного поля в области источников, позволяет надеяться на удовлетворительные результаты сопоставления экспериментальных данных с тем, что дает анализ простых теоретических моделей.

Авторы благодарны сотрудникам Обсерватории Дж. Вилкокса за полученные по ИНТЕРНЕТ данные о магнитных полях на Солнце, и коллективу "SOHO" за полученные по ИНТЕРНЕТ данные о структуре белой короны. Работа выполнена при финансовой поддержке программы Мин. Пром. Науки "Астрономия", Президентской программы "Ведущие научные школы" (грант 00-15-96661) и РФФИ (код проекта 01-02-16308).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Wang Jr. Y.-M., Sheely N. R. *Astrophys. Journ.*, **355**, 726 (1990).
- [2] Kojima M., Kakinuma T. *Space Sci. Rev.*, **53**, 173 (1990).
- [3] Schwenn R. Large-scale structure of the interplanetary medium, in *Physics of the Inner Heliosphere, 1, Large Scale Phenomena*, ed. by R. Schwenn and E. Marsch, Springer-Verlag, New York, 1990, p. 99.
- [4] Tu C.-Y. and Marsch E. *Space Sci. Rev.*, **73**, N1/2, 1 (1995).
- [5] Phillips J. L., Bame S. J., Barnes B. L., et al. *Geophys. Rev. Lett.*, **22**, N 23, 3107 (1995).
- [6] Rickett B. J. and Coles W. A. *Journ. Geophys. Rev.*, **96**, 1717 (1991).
- [7] Sheely N. R. Jr. *Solar Wind Nine*, ed. by Habbal Sh. R., Esser R., Hollweg J., Isenberg P. A. The American Institute of Physics, 1999, p. 41.
- [8] Karpén J. T. *Solar Wind Nine*, ed. by Habbal Sh. R., Esser R., Hollweg J., Isenberg P. A. The American Institute of Physics, 1999, p. 47.
- [9] Luhmann J. G., Larson D., Hoeksema J. T. et al., *Solar Wind Nine*, ed. by Habbal Sh. R., Esser R., Hollweg J., Isenberg P. A. The American Institute of Physics, 1999, p. 725.
- [10] Kojima M., Fujiki K., Hakamada K., et al. *Adv. Space Res.*, **25**, 1893 (2000).
- [11] Tappin S. J., Simnett G. M., and Lyles M. A. *Astron. Astrophys.*, **350**, 302 (1999).
- [12] Hakamada K., Kojima M., Tokumaru M., et al. *Solar Phys.*, **207**, 175 (2002).
- [13] Obridko V. N. and Shelting B. D. *Solar Phys.*, **201**, 1 (2001).

- [14] Srivastava N., Schwenn R., Inhester B., et al. Space Sci. Rev., **87**, 303 (1999).
- [15] Wang Jr. Y.-M., Sheely N. R., Phillips J. L., and Goldstein B. E. Astrophys. Journ., **488**, L51 (1997).
- [16] Lotova N. A., Obridko V. N., Vladimirovskii K. V. Astron. Astrophys., **357**, 1051 (2000).
- [17] Lotova N. A., Obridko V. N., Vladimirovskii K. V., Bird M. K., and Jannardhan P. Solar Phys., **205**, 149 (2002).
- [18] Лотова Н. А., Обридко В. Н., Владимирский К. В. Астроном. журн., **79**, 1 (2002).
- [19] Kojima M., Tokumaru M., Watanabe H., Yokobe A. Journ. Geophys. Res., **103**, A2, 1981 (1998).
- [20] Asai K., Kojima M., Tokumaru M., et al. Journ. Geophys. Res., **103**, A2, 1991 (1998).
- [21] Лотова Н. А., Владимирский К. В., Юровская И. Ю., Корелов О. А. Астроном. журн., **72**, 757 (1995).
- [22] Hockema J. T., Wilcox J. M., Scherrer P. H. Journ. Geophys. Res., **87**, 1033 (1982); *ibid.*, **88**, 9910 (1983).
- [23] Obridko V. N. and Shelting B. D. Solar Phys., **137**, 167 (1992); *ibid.*, **184**, 187 (1999).

Поступила в редакцию 2003 г.