

УДК 523.98

Классификационная схема потоков солнечного ветра

А.Т. Лукашенко¹, И.С. Веселовский^{1,2}, К.Б. Капорцева³

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 2, Москва, Россия, 119991
a_lu@mail.ru

² Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, Россия, 117997
veselov@decl.sinp.msu.ru

³ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 2, Москва, Россия, 119234
kb.kaportceva@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Аннотация. Представлена бинарная классификация типов солнечного ветра по трем главным гидродинамическим параметрам: скорости, температуре и плотности. В пространстве этих параметров определяются границы типов солнечного ветра: быстрого-горячего-плотного, быстрого-горячего-разреженного, быстрого-холодного-плотного, быстрого-холодного-разреженного, медленного-горячего-плотного, медленного-горячего-разреженного, медленного-холодного-плотного, медленного-холодного-разреженного. Эти типы возникают вследствие разных проявлений солнечной активности и встречаются с различной частотой на разных фазах солнечного цикла.

CLASSIFICATION SCHEME OF SOLAR WIND STREAMS, *by A.T. Lukashenko, I.S. Veselovsky, K.B. Kaportseva.* A binary classification of solar wind types, according to the three main hydrodynamic parameters (proton speed, density and temperature), is presented. In the space of these parameters one can define borders for solar wind types: fast-hot-dense, fast-hot-rarefied, fast-cold-dense, fast-cold-rarefied, slow-hot-dense, slow-hot-rarefied, slow-cold-dense, and slow-cold-rarefied. These types arise from different manifestations of solar activity and occur at different frequencies at different phases of a solar cycle.

Ключевые слова: классификация, солнечная активность, солнечный ветер, Солнце

1 Введение

Уже ранние измерения характеристик солнечного ветра, выполненные на аппарате “Маринер-2” в 1962–1963 гг., показали существование потоков, которые принципиально отличаются от окружающего ветра более высокой скоростью (Снайдер и др., 1963). Одна из первых классификаций (на 7 классов) явлений в солнечном ветре была произведена в (Хундхаузен, 1976) на основе сравнения их временных масштабов с характерными физическими временными масштабами. В (Ричардсон, Кейн, 2012) и предшествующих публикациях солнечный ветер вблизи орбиты Земли был подразделен на три типа потоков. Во-первых, это коротирующие высокоскоростные потоки, скорость ветра в которых, как правило, превышает 450 км/с, происходящие из корональных дыр на Солнце. На ведущем краю такого потока формируется область сжатой плазмы – коротирующая область взаимодействия (corotating interaction region – CIR). Во-вторых, более медленный “межпотоковый”

ветер, обычно ассоциированный с поясом стримеров. В-третьих, транзиентные потоки, источниками которых служат корональные выбросы массы (КВМ) на Солнце. В (Ксу, Боровски, 2015) была предложена схема разбиения потоков солнечного ветра на 4 категории по трем параметрам – энтропии протонов, их альвеновской скорости и температуре относительно ожидаемой: 1) плазма корональных дыр, 2) плазма пояса стримеров, 3) плазма секторных границ, 4) межпланетные КВМ. Разбиение производилось на основе количественно установленных критериев.

2 Типы солнечного ветра и их источники

Тем не менее потребность в классификации на основе количественного подхода в настоящее время сохраняется. Поэтому здесь предлагается простая схема, состоящая из следующих элементов количественной классификации солнечного ветра вблизи орбиты Земли с ориентировкой на типичные (средние или наиболее вероятные) значения скорости V (быстрый-медленный), температуры T (горячий-холодный) и плотности n (плотный-разреженный) протонов. Ранее в (Дмитриев и др., 2009) был выполнен анализ данных базы OMNIWeb с часовым разрешением за 20–23 солнечных цикла и получены следующие значения для средних V , T и n соответственно: 430 км/с, $8.3 \cdot 10^4$ К и 5.4 см^{-3} , а также медианные и наиболее вероятные. Так как наибольший интерес вызывают такие отклонения параметров в ту или иную сторону от типичных, которые превышают некоторый порог, а также поскольку удобно производить классификацию по фиксированным числовым значениям, мы в настоящей работе считали солнечный ветер быстрым, если $V > 450$ км/с, и медленным, если $V < 400$ км/с; горячим, если $T > 10^5$ К, и холодным, если $T < 7.5 \cdot 10^4$ К; плотным, если $n > 6 \text{ см}^{-3}$, и разреженным, если $n < 5 \text{ см}^{-3}$. При анализе использовались 1-минутные данные OMNIWeb. Типы обозначены по начальным буквам их англоязычных наименований (fast-slow, hot-cold, dense-rarefied).

Таблица 1. Распространенность типов солнечного ветра в 24-м солнечном цикле (2009–2017 гг.) в процентах

	FHD	FHR	FCD	FCR	SHD	SHR	SCD	SCR
2009	0.63	6.1	0.063	2.6	0.77	0.42	32	23
2010	1.4	15	0.38	3.6	1.0	0.97	24	21
2011	2.4	17	1.1	4.5	1.4	2.0	17	19
2012	2.3	11	0.79	6.0	1.8	1.1	21	19
2013	2.9	8.8	0.56	4.8	1.3	1.4	22	26
2014	2.9	8.3	1.0	3.4	2.5	1.9	23	19
2015	5.8	19	1.9	5.2	1.8	0.62	21	8.2
2016	4.7	24	0.48	3.5	1.7	0.28	23	8.0
2017 (январь – сентябрь)	4.9	27	0.63	5.3	0.75	0.41	23	7.8

Примеры источников для различных типов солнечного ветра (см. рис. 1, 2 и табл. 1):

- FHD – эруптивные солнечные вспышки, а также CIR.
- FHR – длительные потоки из корональных дыр. Распространенный тип, преобладает на спаде цикла солнечной активности (СА). Так, светлое пятно в верхней левой части рис. 1 дал ветер из гигантской корональной дыры 2015–2017 гг. (Андреева и др., 2017).
- FCD – редкий тип, иногда встречается в КВМ (в качестве примеров можно привести события 19–20 июля 2016 г. и 16 июля 2017 г.).
- FCR – области разрежения в хвостовой части высокоскоростных потоков из корональных дыр.
- SHD – малораспространенный тип, встречается преимущественно тогда же, когда и SCD.
- SHR – так же, как и FCD, сравнительно редкий тип, что связано с существенно положительной корреляцией между V и T и отрицательной – между V и n .

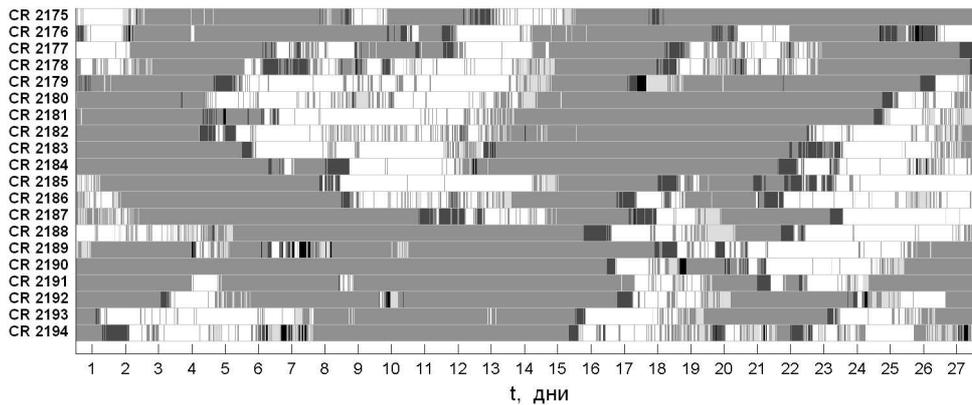


Рис. 1. Чередование типов быстрого ($V > 450$ км/с) солнечного ветра на протяжении 20 кэррингтоновских оборотов (2175–2194). Тип FHD обозначен темно-серым цветом, FHR – белым, FCD – черным, FCR – светло-серым

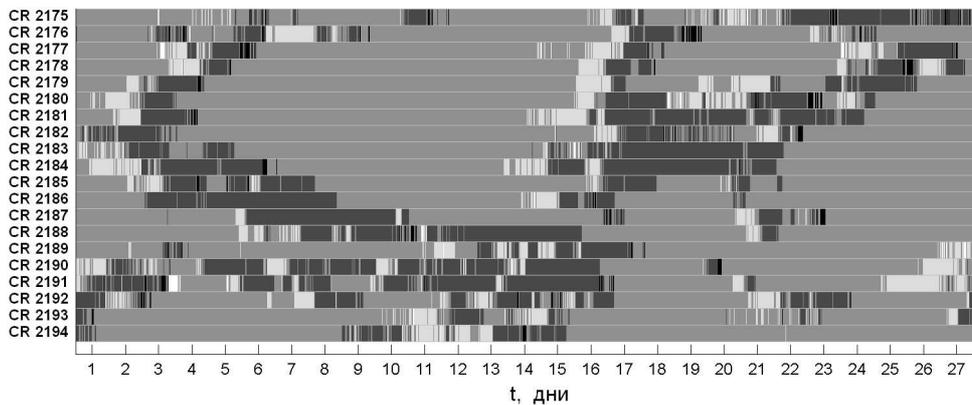


Рис. 2. Чередование типов медленного ($V < 400$ км/с) солнечного ветра на протяжении 20 кэррингтоновских оборотов (2175–2194). Тип SHD обозначен черным цветом, SHR – белым, SCD – темно-серым, SCR – светло-серым

- SCD – потоки из корональных стримеров и псевдостримеров. Тип преобладает в минимуме цикла СА.
- SCR – нередко служит переходным от FCR к SCD.

Литература

- Андреева и др. (Андреева О.А., Малащук В.М., Ахтемов З.С., Жигалкин Р.К.) // XXI Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2017”. СПб.: ГАО РАН. 2017. С. 29.
- Дмитриев и др. (Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S.) // Handbook on solar wind: effects, dynamics and interactions / Ed. Johannson H.E. New York: Nova Science Publishers. 2009. P. 81.
- Ксу, Боровски (Xu F., Borovsky J.E.) // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 70.
- Ричардсон, Кейн (Richardson I.G., Cane H.V.) // J. Space Weather Space Clim. 2012. V. 2. id. A02.
- Снайдер и др. (Snyder C.W., Neugebauer M., Rao U.R.) // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. P. 6361.
- Хундхаузен А.Д. // Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир. 1976.